

อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึกโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการ
ไฮโดรไดนามิกส์

INFLUENCE OF NON FERROUS IN HYDRODYNAMICS
DEEP DRAWING PROCESS

ชญญพัฒน์ เจียรละม่อม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

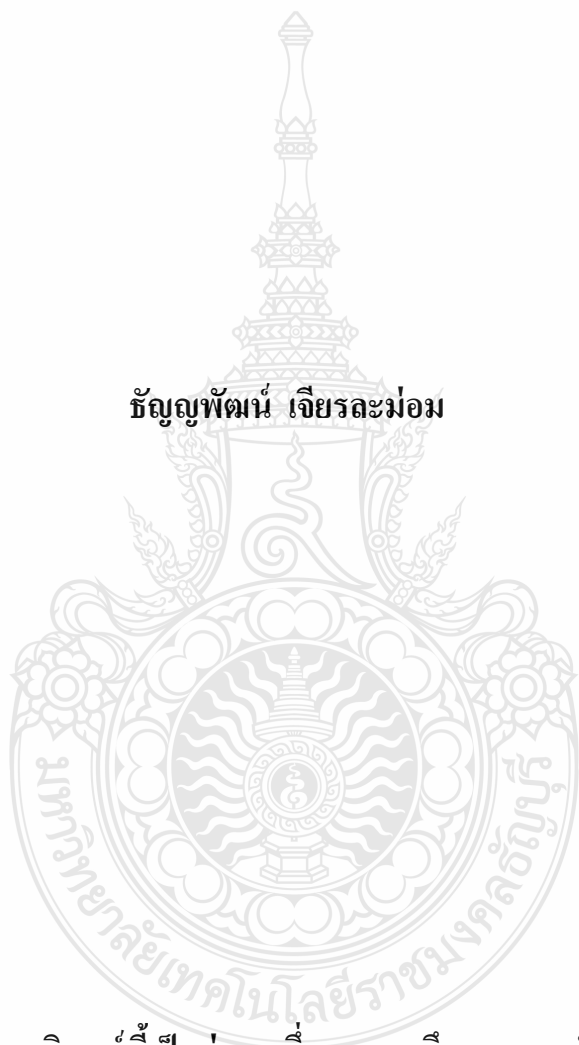
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลในการตกชั้นรูปลึกละหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการ
ไฮโดรไดนามิกส์



ธัญญพัฒน์ เจียรละม่อม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึกละหนอกกลุ่มเหล็กด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์
ชื่อ-นามสกุล	นายธัญญพัฒน์ เจียรละม่อม
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

รอย่น รอยฉีกขาด และความหนาที่ไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานเป็นปัญหาที่สำคัญในด้านคุณภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกละหนอกแผ่น ด้วยเหตุนี้จึงประยุกต์ใช้กระบวนการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ เพื่อลดปัญหาเหล่านี้และเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึกละหนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ และเปรียบเทียบตัวแปรที่เกิดจากการลากขึ้นรูปลึกละหนอกแบบปกติและการลากขึ้นรูปลึกละหนอกแบบไฮโดรไดนามิกส์

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ทองแดงเกรด C1100 และทองเหลืองเกรด C2801 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ชิ้นงานตัดเป็นแผ่นกลมมีขนาดเริ่มต้นเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ถูกนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์หลายตัวแปรการผลิตประกอบด้วย น้ำมันไฮดรอลิกเกรด TIS 3 แรงดันน้ำมัน 2.5 - 7.5 MPa. และแรงกดชิ้นงาน 3 ระดับ คือ 1.884 - 7.130 kN หลังการขึ้นรูปชิ้นงานถูกนำไปตรวจสอบค่าความหนา ความเครียด รอย่นและรอยฉีกขาดของชิ้นงาน

ผลการทดลองพบว่า แรงดันน้ำมันเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งต่อการลากขึ้นรูป การเพิ่มแรงดันน้ำมันส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปสูงขึ้นและความหนาสม่ำเสมอมากขึ้น ทองแดง C1100 ที่ยากต่อการลากขึ้นรูปแบบปกติ สามารถทำได้ด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ทองแดง C1100 มีความหนาเพิ่มขึ้น 3.872% เมื่อแรงดันน้ำมันมีค่า 5.0 MPa และแรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ในขณะที่ทองเหลือง C2801 สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งแบบปกติและแบบไฮโดรไดนามิกส์ ที่ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 4.916 % ที่ แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa แรงกดชิ้นงาน 3.924 kN และไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่แรงกดแผ่นชิ้นงาน 7.130 kN และแรงดันน้ำมัน 7.5 MPa

คำสำคัญ: การลากขึ้นรูปลึกละหนอก กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ แรงกดชิ้นงาน

Thesis Title	Influence of Non Ferrous in Hydrodynamics Deep Drawing Process
Name – Surname	Mr. Thanyapat Jianlamom
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic Year	2013

ABSTRACT

Wrinkle, tears and non-uniform thickness of the specimen is an important quality problems of sheet metal deep drawing process. For this reason hydrodynamics deep drawing was applied to reduce these problems and increase strength to the specimen. This research aims to study the influence of non ferrous in hydrodynamics deep drawing processes and compare variables from the normal deep drawing and hydrodynamics deep drawing process.

The materials used in this study were C1100 copper and C2801 brass with 0.5 mm in thickness. The materials that were prepared to be a specific shape and size deep drawn by various hydrodynamics process parameters. The hydrodynamics process parameter was the hydraulic oil of TIS-3, the oil pressure of 2.5-7.5 MPa, and the blank holder force of 1.884-7.130 kN The deep drawn specimen was prepared and investigated for a thickness variation, a strain formation and a tear path.

The experimental results revealed that the oil pressure was mainly affected to a deep drawing process. Increase of the oil pressure affected to increase the deep drawing force and produce the uniform thickness of the specimen. C1100 copper that was difficult to produce by the normal deep drawing process could perform by a hydrodynamics process. The C1100 copper specimen thickness was increase to be 3.872% when the oil pressure of 5.0 MPa and the blank holder force of 7.130 kN were applied to produce a specimen. The C2801 brass could produce by the normal deep drawing process and the hydrodynamics process. The C2801 brass specimen thickness was increase to be 4.916% when the oil pressure of 7.5 MPa and the blank holder force of 3.942 kN were applied to produce a specimen but cloud not produced by the oil pressure of 7.5 MPa and the blank holder force of 7.130 kN

Keywords: deep drawing, hydrodynamics process, blank holder force

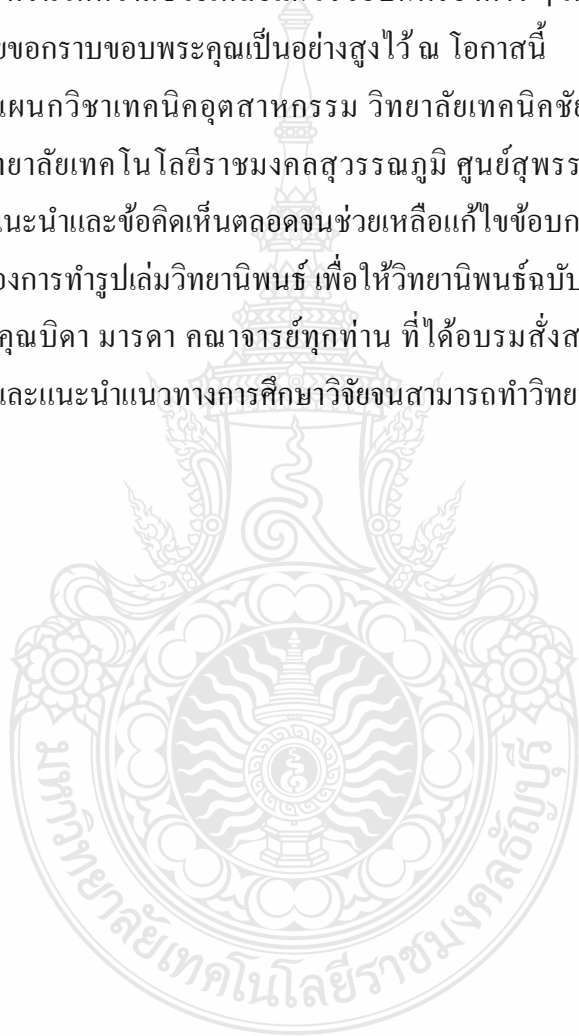
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ดร.กฤษชาติ จุลเพ็ญ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามาระ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ แผนกวิชาเทคนิคอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท และ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ คำแนะนำและข้อคิดเห็นตลอดจนช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทั้งในส่วนของ การวิจัยและในส่วนของการทำงานรูปเล่มวิทยานิพนธ์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา คณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทความรู้วิชาการต่างๆ และแนะนำแนวทางการศึกษาวิจัยจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วง

ธัญญพัฒน์ เกียรละม่อม

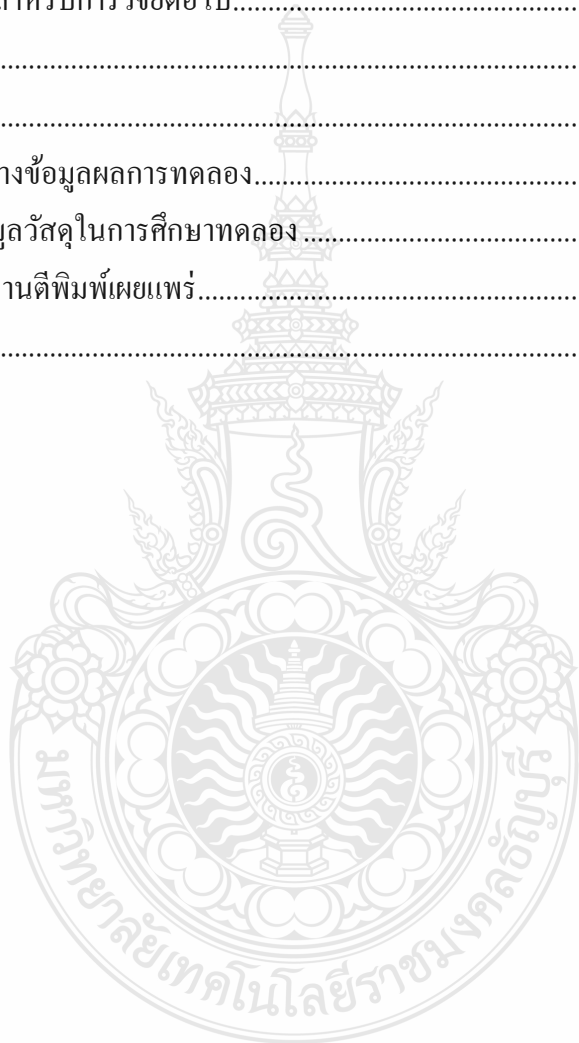


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	16
1.4 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	17
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 แนวความคิด.....	18
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	50
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1 การดำเนินการวิจัย.....	54
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	54
3.3 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง.....	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย.....	76
4.1 อิทธิพลของแรงกดแผ่นชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปดัดขึ้นงานแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ด้วยกระบวนการ ไฮดรอไดนามิกส์.....	76
4.2 อิทธิพลของแรงดันน้ำมันที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์.....	86
4.3 เปรียบเทียบคุณภาพชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปดัดด้วย กระบวนการไฮดรอไดนามิกส์.....	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย	109
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	109
5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง.....	111
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลผลการทดลอง.....	116
ภาคผนวก ข ข้อมูลวัสดุในการศึกษาทดลอง	138
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	159



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าตัวคูณประกอบของการแตก a_{cr} ของวัสดุต่างๆ	24
ตารางที่ 2.2 ค่าประกอบของวัสดุ	25
ตารางที่ 2.3 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$	26
ตารางที่ 2.4 ระบบ หน่วย และอนุกรมที่วัดความหนืดของน้ำมัน	37
ตารางที่ 3.1 สมบัติของทองแดง เกรด C1100	59
ตารางที่ 3.2 สมบัติของทองเหลือง เกรด C2801	59
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดา	69
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดาด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ น้ำมันไฮดรอลิก เกรด 68	70
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติและลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการ ไฮดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884 kN	83
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติและลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการ ไฮดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดแผ่นชิ้นงาน 3.942 kN	84
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติและลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการ ไฮดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดแผ่นชิ้นงาน 7.130 kN	85

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)..... 19
รูปที่ 2.2	วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปด้วย 20
รูปที่ 2.3	ส่วนย่อยในหน้าสัมผัสของวงกลม 20
รูปที่ 2.4	หน้าสัมผัสความเค้นและปริมาตรความเครียดของจุดต่างๆบนผิวสัมผัส..... 21
รูปที่ 2.5	ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปสภาวะที่ปราศจากแรงเสียดทานความเค้นภายในผนังมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด คือ รัศมีความเค้นที่รัศมีวงใน σ_{ii} . 22
รูปที่ 2.6	เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของพื้นที่สำหรับวัสดุที่เกิดความเครียดเชิงตัว 23
รูปที่ 2.7	รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก..... 24
รูปที่ 2.8	แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปถ้วย 26
รูปที่ 2.9	การลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์..... 27
รูปที่ 2.10	กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว 28
รูปที่ 2.11	ส่วนต่างๆของระบบ Hydrodynamics Deep Drawing..... 29
รูปที่ 2.12	หลักการการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยการใช้กฎของปาสคาล 34
รูปที่ 2.13	หลักการของความหนืด 38
รูปที่ 2.14	แรงดึง (Tensile)..... 40
รูปที่ 2.15	แรงกด (Compression)..... 41
รูปที่ 2.16	แรงเฉือน (Shear)..... 41
รูปที่ 2.17	ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ 42
รูปที่ 2.18	ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)..... 43
รูปที่ 2.19	ความเครียดเฉือน (Shear Strain)..... 44
รูปที่ 2.20	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point). 44
รูปที่ 2.21	ตารางวงกลมบนโลหะแผ่น 45
รูปที่ 2.22	แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก 46
รูปที่ 2.23	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm..... 47

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.1	แผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง	54
รูปที่ 3.2	น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เกรด ISO VG 68.....	55
รูปที่ 3.3	สปริงที่ใช้ในการทดลอง	55
รูปที่ 3.4	ภาพเครื่องกัด CNC ชนิด 5 แกน	56
รูปที่ 3.5	เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน	56
รูปที่ 3.6	ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก	57
รูปที่ 3.7	ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร	57
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงของโลหะผสม ตามมาตรฐาน ASTM E8.....	58
รูปที่ 3.9	แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 ชนิด.....	59
รูปที่ 3.10	ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก.....	60
รูปที่ 3.11	ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์.....	63
รูปที่ 3.12	แผนสวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก	64
รูปที่ 3.13	วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก	65
รูปที่ 3.14	ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊ม โดยตรง.....	65
รูปที่ 3.15	ขั้นตอนของการกัดแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง	66
รูปที่ 3.16	แผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง เมื่อกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว	66
รูปที่ 3.17	แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว	68
รูปที่ 3.18	อุปกรณ์วัดแรงกดสำหรับต่อพวงเข้ากับเครื่องบีบอัด	68
รูปที่ 3.19	แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องบีบอัดเรียบร้อยแล้ว	69
รูปที่ 3.20	อุปกรณ์วัดแรงดันและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป.....	70
รูปที่ 3.21	ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป	71
รูปที่ 3.22	การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing	72
รูปที่ 3.23	การวัดอัตราความเครียดหลักและอัตราความเครียดรอง	73
รูปที่ 3.24	ลักษณะของกริดวงกลมก่อนและที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป	74
รูปที่ 3.25	กริดวงกลมที่ทำการวัดหลังการขึ้นรูปในตำแหน่งก้นด้วยบริเวณกึ่งกลางและขอบด้วย	74
รูปที่ 3.26	กริดวงกลมที่ทำการวัดในตำแหน่งผนังด้วยด้านข้างและมุมตาย	74
รูปที่ 3.27	กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการร้าวบนผิวชิ้นงาน	75

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.1	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติ.....	77
รูปที่ 4.2	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa	77
รูปที่ 4.3	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa	77
รูปที่ 4.4	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa	78
รูปที่ 4.5	แรงลากขึ้นรูปสูงสุดแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa .	79
รูปที่ 4.6	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติ.....	79
รูปที่ 4.7	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa	80
รูปที่ 4.8	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa	81
รูปที่ 4.9	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa	82
รูปที่ 4.10	แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C2801 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa..	82
รูปที่ 4.11	ค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 2 ชนิด ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงกด 1.884 kN	83
รูปที่ 4.12	ค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่น ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN.....	84
รูปที่ 4.13	ค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN.....	85

สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.14	ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมันต่างๆ.....	84
รูปที่ 4.15	ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ขึ้นรูปแบบ ปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมันต่างๆ.....	87
รูปที่ 4.16	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์	88
รูปที่ 4.17	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์	89
รูปที่ 4.18	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์.....	90
รูปที่ 4.19	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์.....	91
รูปที่ 4.20	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์	92
รูปที่ 4.21	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์	93
รูปที่ 4.22	ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป	95
รูปที่ 4.23	ความหนาของชิ้นงานทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN....	96
รูปที่ 4.24	ความหนาของชิ้นงานทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN....	97
รูปที่ 4.25	ความหนาของชิ้นงานทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN....	98
รูปที่ 4.26	ความหนาของชิ้นงานทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN	99
รูปที่ 4.27	ความหนาของชิ้นงานทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN	100
รูปที่ 4.28	ความหนาของชิ้นงานทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN	101
รูปที่ 4.29	ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม	102
รูปที่ 4.30	แผ่นภาพตัดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN.....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.31 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN.....	103
รูปที่ 4.32 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN.....	104
รูปที่ 4.33 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN.....	105
รูปที่ 4.34 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN.....	106
รูปที่ 4.35 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN.....	107



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น หรือ Sheet Metal Forming (SMF) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามที่ต้องการ มีกรรมวิธีที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปหลายวิธี เช่น การปั๊มตัดเฉือน, การปั๊มขึ้นรูป และการลากขึ้นรูปลึก เป็นต้น การลากขึ้นรูปจะอาศัยการเคลื่อนที่ของพUNCHกดแผ่นชิ้นงานเข้าสู่คาย เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน ขณะที่วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่าง วัสดุจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างแผ่นชิ้นงานและผิวหน้าของคาย ซึ่งอาจส่งผลทำให้วัสดุมีความหนาไม่สม่ำเสมอ เกิดการฉีกขาด หรือเกิดรอยร้าว เป็นสิ่งที่ต้องคิดหาวิธีการที่ปรับปรุงและแก้ไข การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยของเหลว โดยเฉพาะกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้การเคลื่อนที่ของของเหลว เป็นการนำแรงดันของเหลวเข้ามาช่วยในการลากขึ้นรูปลึก โดยเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นสำหรับกระบวนการทางด้านการขึ้นรูปโลหะ ที่มีโครงสร้างเป็นโลหะเบา และมีความยืดหยุ่นในกระบวนการการทำงานสูง [1] การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว เป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีความสำคัญ และใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ภายในครัวเรือน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนของเครื่องบิน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยที่การขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางด้านไฮโดรฟอर्मมิ่ง สามารถใช้ได้กับการขึ้นรูปทั้งโลหะแผ่น และ การขึ้นรูปท่อ [2]

การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการแบบไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamics Deep Drawing) ในหลักการจะใช้น้ำมันหรือของเหลวที่มีความดันสูงเข้ามาช่วยการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในขณะที่มีการเคลื่อนตัวของพUNCH กดลงบนชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปเข้าสู่คาย ของเหลวที่มีความดันจะเคลื่อนตัวไหลอยู่ระหว่างพื้นผิวด้านล่างของคายกับแผ่นโลหะ กระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าของอัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio, LDR) และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน [3]

ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งศึกษาถึงกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามที่กำหนด โดยลากขึ้นรูปโลหะแผ่นทั้งกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติและลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ โดยตัวแปรที่สำคัญ คือ แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) และแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิก (Internal Fluid Pressure) ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน [4] น้ำมันไฮดรอลิกที่นำมาใช้ คือ น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เกรด 68 จากงานศึกษาวิจัยของ กฤษดา บรรเทาพิศ [5] ในเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของ

ของเหลวในการลากขึ้นรูปเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ปี 2555 ซึ่งนำเอาน้ำมันไฮดรอลิกเกรด 68, 46 และ 32 นำมาทดลอง เพื่อศึกษาถึงแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็กและคุณภาพชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในสถานะของความดันและความหนืดที่แตกต่างกัน พบว่า ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC โดยพิจารณาจากแผ่นภาพขีดจำกัดของการขึ้นรูป ของเหลวค่าความหนืด ISO VG 68 [6,7] ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กแบบไฮโดรไดนามิกส์ สิ่งที่น่าสนใจประกอบไปด้วย 1.ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) ของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก คือ ทองแดง และทองเหลือง, 2.แรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force) และ 3.คุณภาพและความเสียหายของชิ้นงานในสถานะต่างๆของการลากขึ้นรูป โดยนอกจากชนิดของโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่เป็นตัวแปรหลักในการศึกษาทดลองแล้ว ตัวแปรสำคัญในกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยของเหลว Hydrodynamics Deep Drawing ที่นำมาศึกษาทดลองร่วมด้วยคือ แรงจับยึดแผ่นโลหะ (Blank Holder Force) และความดันของเหลวภายใน (Internal Fluid Pressure) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่ากระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กแบบไฮโดรไดนามิกส์ ของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 นั้น จะสามารถเพิ่มความความสามารถในการขึ้นรูปและแก้ไข ปัญหาคุณภาพของชิ้นงานของทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ได้หรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาแรงดันน้ำมันที่มีอิทธิพลต่อการลากขึ้นรูปซึ่งเป็นแรงกระทำต่อชิ้นงานแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กแบบไฮโดรไดนามิกส์

1.2.2 ศึกษาแรงกดแผ่นชิ้นงานที่มีอิทธิพลต่อแรงลากขึ้นรูปที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็กแบบไฮโดรไดนามิกส์ และคุณภาพของชิ้นงาน

1.2.3 เปรียบเทียบคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปเหล็กแบบปกติและลากขึ้นรูปเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติและการลากขึ้นรูปลึกลับแบบไฮโดรไดนามิกส์ โดยศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 2 ชนิด คือ ทองแดง เกรด C1100 และ ทองเหลือง เกรด C2801 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ชิ้นงานตัดเป็นแผ่นกลมมีขนาดเริ่มต้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ทำการลากขึ้นรูปลึกลับเป็นรูปถ้วยด้วยทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร แบบมีปีกขนาด 5 มิลลิเมตร มีความลึกถ้วย 15 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing Ratio: DR) เท่ากับ 1.8 [8]

1.3.2 แม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 [9] ชุบแข็งและชุบฮาร์ดโครม (Hard Chrome) ในชั้นส่วนที่สัมผัสเกิดการเสียดสีกับอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของน้ำมันไฮดรอลิก ทำการศึกษาทดลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกลับ ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวความดันสูง (Hydrodynamics Deep Drawing) ด้วยการออกแบบแม่พิมพ์ให้สอดคล้องกับกระบวนการดังกล่าว

1.3.3 แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Force) ใช้แรงจากการกดของสปริงแม่พิมพ์ ตามมาตรฐาน JIS B 5012 Coild Helical Spring for Press Dies [10] ขนาดของแรงกดแผ่นชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง มี 3 ระดับ คือ 1.884 kN, 3.924 kN และ 7.130 kN และแรงดันของน้ำมันภายในห้องบรรจุของเหลว (Chamber) ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับ คือ 2.5, 5.0 และ 7.5 MPa

1.3.4 ศึกษาถึงแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force) ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamics Deep Drawing) โดยใช้ Load Cell ในการวัดแรงกด เปรียบเทียบกับแรงในการลากขึ้นรูปที่ได้จากการคำนวณ

1.3.5 ศึกษาถึงคุณภาพของชิ้นงาน โดยพิจารณาถึงปัญหาที่พบในกระบวนการลากขึ้นรูปอันประกอบไปด้วย การฉีกขาด และรอยย่น

1.3.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนาของชิ้นงานของวัสดุทั้ง 2 ชนิด เปรียบเทียบความหนาก่อนและหลังการขึ้นรูป

1.3.7 ศึกษาถึงความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ เพื่อสร้างแผนภาพขีดจำกัดของการขึ้นรูป (FLD, Forming Limit Diagram)

1.4 ข้อจำกัดของการศึกษา

1.4.1 สำหรับตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในครั้งนี้คือ รูปแบบของการขึ้นรูป ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้รูปแบบของการขึ้นรูปที่ง่าย และมีแหล่งของข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุทดสอบ และ ตัวแปรต่างๆ ของเครื่องมือ (Tooling Parameter) ต่างๆ

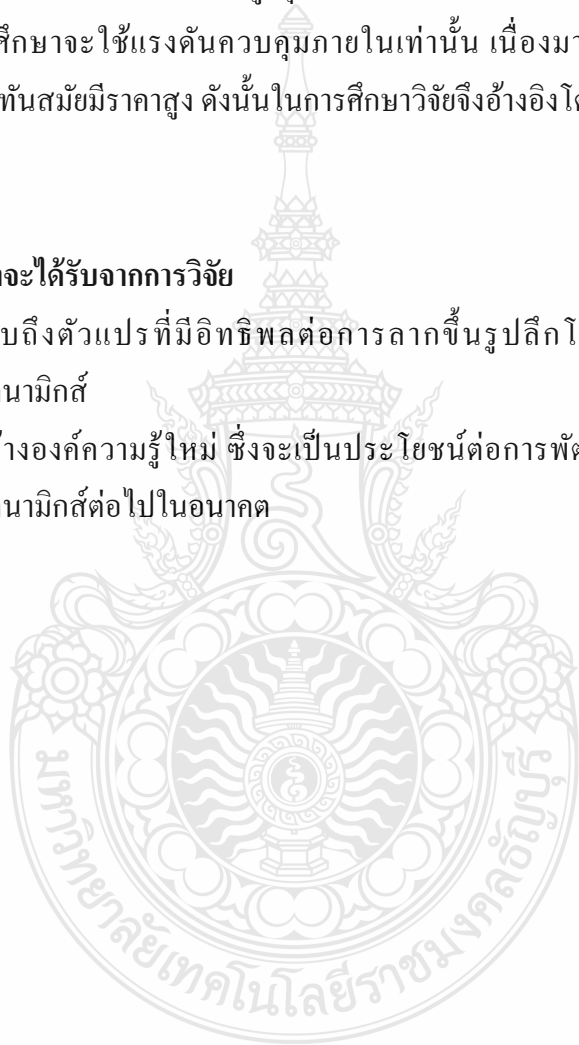
1.4.2 ความดันภายในของของเหลวที่ใช้ในการทดลองสูงสุดทำได้ 300 Bar เนื่องจากชุดต้นกำลังของระบบไฮดรอลิก ปกติแล้วทำได้สูงสุด 700 Bar เพื่อความปลอดภัยในการทดสอบ

1.4.3 การศึกษาจะใช้แรงดันควบคุมภายในเท่านั้น เนื่องมาจากเป็นการศึกษาเริ่มต้น ประกอบกับอุปกรณ์ที่ทันสมัยมีราคาสูง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยจึงอ้างอิงโดยใช้แรงดันควบคุมในการทดลองเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการลากขึ้นรูปลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์

1.5.2 เป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาการลากขึ้นรูปลึงด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ต่อไปในอนาคต



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

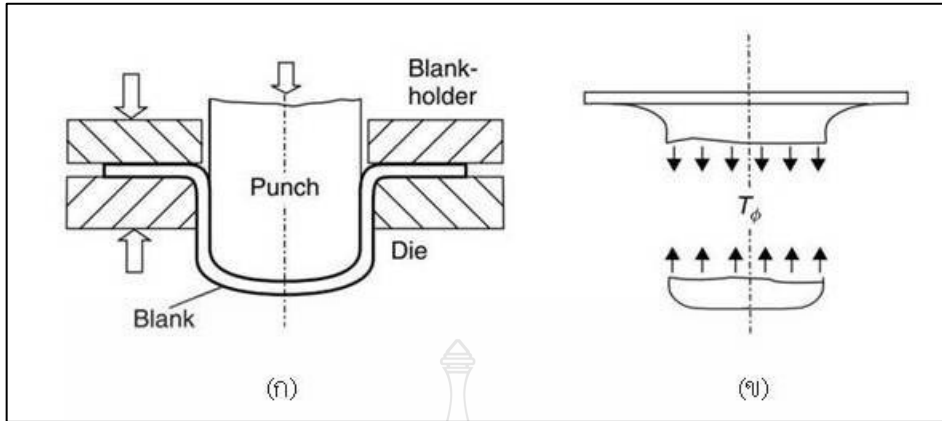
2.1 แนวความคิด

จากการค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมต่างๆ ที่ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึงโลหะแผ่น และความพยายามในการเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น โดยการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ โดยการใช้น้ำมันเข้าไปแทนที่อากาศภายในห้องแม่พิมพ์ พบว่าน้ำมันจะมีความสามารถในการกระจายตัวของแรงได้ดีกว่าอากาศ ในขณะเดียวกันยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นอีกด้วย [11] ในขณะที่น้ำมันมีการเคลื่อนที่ (Hydrodynamics) กระบวนการดังกล่าวเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างผิวแผ่นโลหะกับผิวคาย และเพิ่มความสามารถในการไหลตัวของโลหะในขณะทำการขึ้นรูป ในการศึกษาทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยพิจารณาอิทธิพลของวัสดุซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กซึ่งมีความสามารถในการขึ้นรูปได้น้อยมาก เช่น อลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีความสามารถในการขึ้นรูปปานกลาง เช่น ทองแดงบริสุทธิ์ และมีความสามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น ทองเหลือง [12] อิทธิพลของแรงดันน้ำมันที่ใช้ในการลากขึ้นรูปโดยเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติโดยไม่ใช้ของน้ำมัน กับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ อิทธิพลของแรงกดชิ้นงาน อิทธิพลของแรงในการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ซึ่งแรงในการลากขึ้นรูปมีผลสำคัญต่อ การเกิดรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน ผลจากความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงาน และชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปมีลักษณะของปัญหาที่สำคัญนอกจากรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงานแล้ว ยังมีรอยย่นที่ปากถ้วยและความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การลากขึ้นรูปลึง (Deep Drawing)

กระบวนการลากขึ้นรูปลึงเป็นการขึ้นรูปวัสดุแผ่นเรียบให้มีรูปร่างต่างๆ โดยการใช้แรงกดจากแม่พิมพ์พUNCH กดลงไปยังแผ่นชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์คาย (Die) โดยที่ความหนาของชิ้นงานยังเท่ากับวัสดุตั้งต้น กระบวนการลากขึ้นรูปลึงมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาย พUNCH และ ตัวกดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Ring) สำหรับกดแผ่นชิ้นงานให้แนบกับแม่พิมพ์คาย ในขณะทำการขึ้นรูป (Blank Holder Force) [12,13]



- (ก) การลากขึ้นรูปด้วยวงกลมทรงกระบอก,
- (ข) การขยายตัวตามแนวการขึ้นรูปและแรง ลากขึ้นรูปโดยเป็นแรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณผนังถ้วย

รูปที่ 2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) [13]

1. หน้าสัมผัสในการลากขึ้นรูป

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

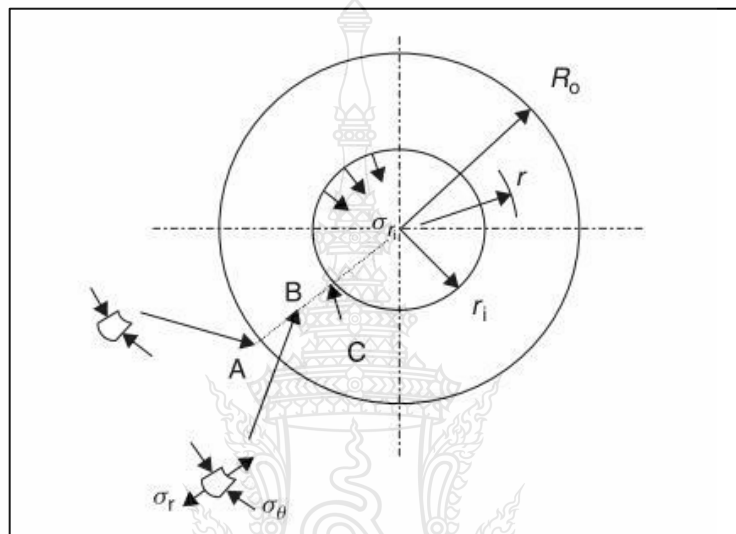
$$(\sigma_r + d\sigma_r)(t + dt)(r + dr)d\theta = \sigma_r t r d\theta + \sigma_\theta t dr d\theta \tag{2.1}$$

เมื่อยุบรวมสมการแล้วจะได้

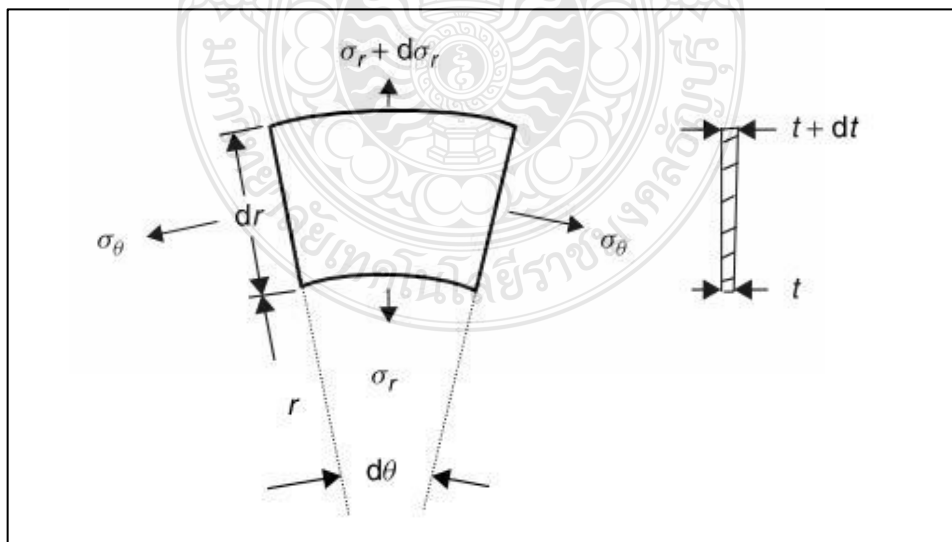
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r}{t} \frac{dt}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0 \tag{2.2}$$

ที่บริเวณขอบของวงกลมจุด A เป็นพื้นผิวอิสระ $\sigma_r = 0$ ดังนั้น ความเค้นอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้น $\sigma_\theta = -\sigma_r$ เมื่อ σ_r คือ ความเค้นไหลดที่เกิดขึ้นจริง ที่เส้นรัศมีกลาง ที่จุด B รัศมีความเค้นจะอยู่ตรงข้ามกันและมีขนาดเท่ากัน นั่นก็คือ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (Hoop Stress) อยู่บริเวณขอบด้านใน จุด C รัศมีความเค้นมีค่าสูงสุด ลักษณะของการเกิดความเค้น และความสอดคล้องกันปริมาณ

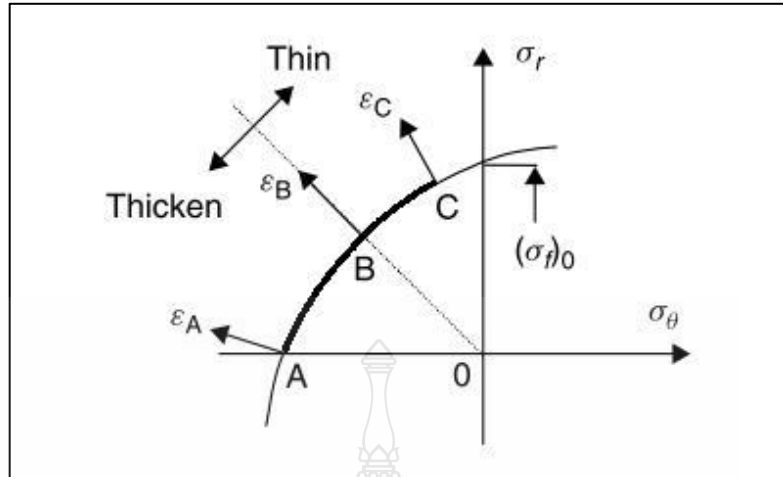
ความเครียด ปรากฏเป็นตำแหน่งของการเกิดความเค้นจุดครากฟอนมิสเสส (Von Mises) ในรูปที่ 2.4 บริเวณขอบด้านนอก A วัสดุแผ่นจะมีความหนาเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ในขณะที่เดียวกันที่จุด B ความหนาจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไป บริเวณด้านในขอบ C จะเกิดเป็นแผ่นบาง ทั้งหมดนี้เป็นภาพรวมของการลากขึ้นรูป พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของวัสดุในช่วงต้นจะไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการกำหนดขนาดของวัสดุแผ่นก่อนการขึ้นรูปเป็นเพียงการประมาณการเท่านั้น



รูปที่ 2.2 วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปด้วย [13]



รูปที่ 2.3 ส่วนย่อยในหน้าสัมผัสของวงกลม [13]



รูปที่ 2.4 หน้าสัมผัสความเค้นและปริมาณความเครียดของจุดต่างๆบนผิวสัมผัส [13]

ความเค้นซึ่งก่อตัวเพิ่มขึ้นขึ้นของผิวสัมผัสในกระบวนการการลากขึ้นรูป หาได้โดยสมการที่ 2.3 และการเปลี่ยนรูปที่ตามมาจะใช้วิธีการความสัมผัสทางคณิตศาสตร์ ซึ่งปัจจุบันได้ล้ำสมัยไปแล้วแต่เราสามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้จากสถานะความเสียหายที่จุดครากของทีคา (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 เมื่อกำหนดให้ขอบเขตสถานะ $\sigma_r = 0$ ที่รัศมีวงนอก R_o และ $\sigma_r = \sigma_{ri}$ ส่วนรัศมีวงใน r_i เป็นการกำหนดขึ้น

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

หรือ

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

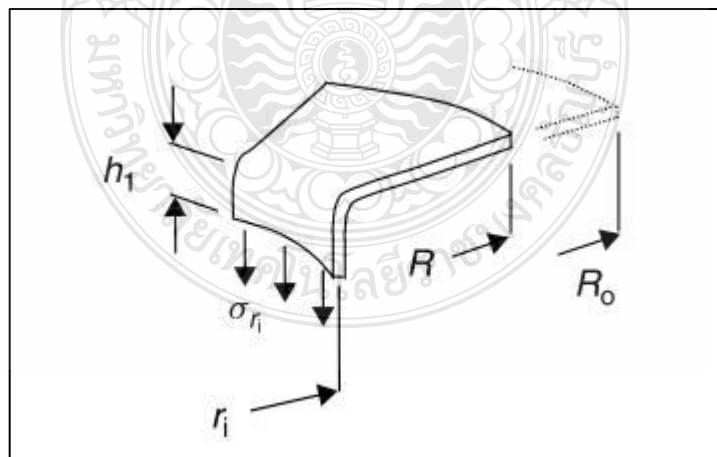
สำหรับวัสดุที่ไม่เกิดความเครียดเชิงตัว รัศมีความเค้นซึ่งให้ไว้โดยสมการที่ 2.4 เป็นตัวหารร่วมที่จุดเริ่มต้น และจะลดลงเมื่อเข้าใกล้รัศมีวงนอก ความเค้นที่ผนังของถ้วยวัสดุเกิดขึ้นได้อย่างถาวร เมื่อ $(\sigma_p)_0$ คือ ความเค้นตามสภาวะที่คา ดังนั้น เอา $\sigma_{ri} = (\sigma_p)_0$ เข้าไปแทนที่ในสมการที่ 2.4 ทำให้ทราบถึงความกว้างของแผ่นวัสดุที่สามารถนำมาลากขึ้นรูปได้ นั่นก็คือค่าของ “อัตราส่วนจำกัดของการลากขึ้นรูป” (Limiting Drawing Ratio)

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

2. ผลกระทบของความเครียดเชิงตัว

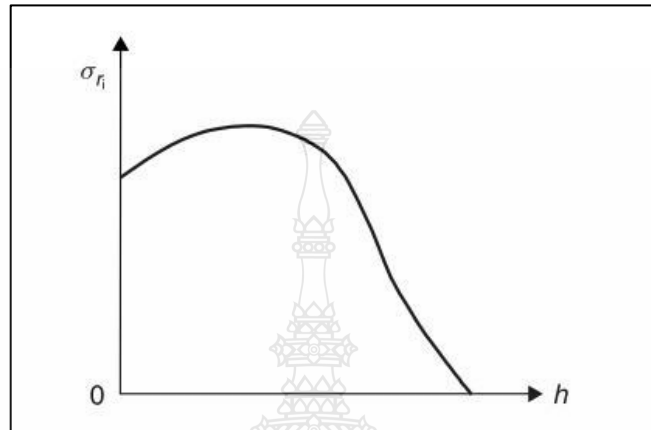
ค่าความเครียดเชิงตัว ความเค้นที่กระทำต่อพื้นผิวสัมผัส อาจเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่ถึงแม้ว่ารัศมีวงนอกจะลดลง เมื่อพื้นผิวจะถูกลากขึ้นรูปเข้าไปยังด้านใน รัศมีวงนอก R จะลดลงอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 2.5 ค่าความเครียดเชิงตัวจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ถ้าสมมุติให้เป็นค่าความเค้นเฉลี่ย $(\sigma_p)_{av}$ กระทำอยู่บนพื้นผิวทั้งหมด และไม่คำนึงถึงความหนาที่ไม่เสมอกัน จะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2.6

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



รูปที่ 2.5 ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปสถานะที่ปราศจากแรงเสียดทาน ความเค้นภายในผนังมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด คือ รัศมีความเค้นที่รัศมีวงใน σ_{ri} [13]

ดังนั้นการกำหนดค่าตัวแปรทั้งสองที่ตรงข้ามกัน คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้นจนกระทั่งวัสดุเกิดการแข็งตัว และการลดลงของความเค้นที่รัศมี R อย่างช้าๆ โดยปกติแล้วความเค้นในขณะการลากขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุดและจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่ของพื้นที่สำหรับวัสดุที่เกิดความเครียดแข็งตัว [14]

ในการเลือกอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากที่สุด คือ $\beta = d_0/d_1$ ค่านี้จะเป็นค่าที่ใช้แรงสูงสุดในการลากขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่าแรงสูงสุดนี้จะถูกส่งผ่านไปที่ผนังของชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูป ดังนั้นอัตราส่วนการขึ้นรูปจะต้องไม่มากกว่าค่าสูงสุด ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{max} เป็นค่าเพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกที่ก้นชิ้นงานขึ้นงาน ในสมการ 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 [14]

วัสดุ	a_{cr}
Deep Drawing Steel Sheet, RSt 14 (SAE 1006)	1.05-1.55 \approx 1.30
Austenite Steel Sheet, X 5 Cr Ni 18 9 (AISI 304)	0.95-1.305 \approx 1.13
Brass, 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

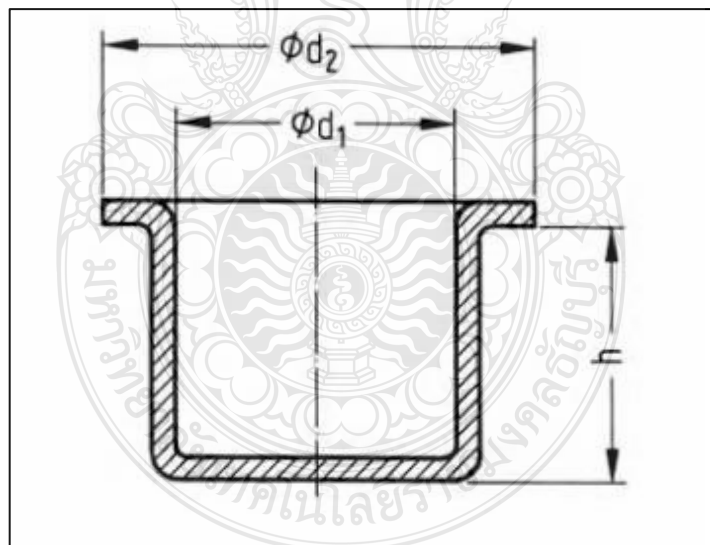
3. การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการลากขึ้นรูปลึก

สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ ในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอก สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ [15]

1) ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นสำหรับการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก [14]

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

2.9



รูปที่ 2.7 รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก [16]

2) ขนาดของมุมคายแม่พิมพ์ [15,16]

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

3) ระยะช่องว่างแม่พิมพ์พื้นที่กับด้าย [15]

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

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

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

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

4) แรงกดแผ่นขึ้นงาน

เป็นแรงที่ใช้กดแผ่นขึ้นงาน โดยการใช้แผ่นกดขึ้นงาน กดที่แผ่นขึ้นงานโดยตรง [14] 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) [14]

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

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

แรงกดแผ่นขึ้นงาน (Blank Holder Force) [14]

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

5) แรงในการลากขึ้นรูป

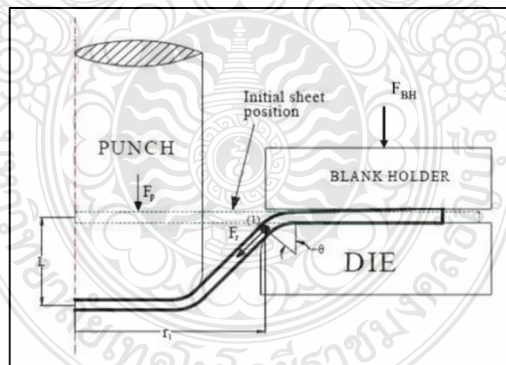
แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งแม่พิมพ์ซึ่งเป็นตัวกดหรือพันซ์กระทำต่อแผ่นชิ้นงาน ในรูปที่ 2.1 แรงกดพันซ์ในการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก ของกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก การคำนวณแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก คำนวณได้ตามสมการที่ 2.16 [16]

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

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

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

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

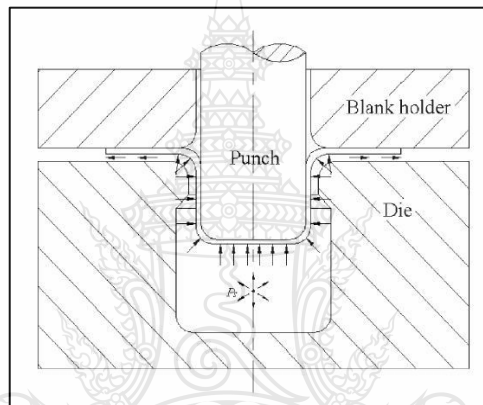


รูปที่ 2.8 แรงกดพันซ์ในการขึ้นรูปด้วย [17]

4. การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว (Sheet Hydroforming)

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว หรือ Sheet Hydroforming มีลักษณะการขึ้นรูปโลหะแผ่นคล้ายกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไป โดยมีชุดแม่พิมพ์ตาย และชุดแม่พิมพ์พันซ์ ทำการกดโลหะแผ่น

ให้เป็นชิ้นงาน ให้มีรูปร่างตามที่กำหนดเพียงแต่ภายในแม่พิมพ์นั้นจะบรรจุไปด้วยน้ำมันหรือของเหลวอื่นๆ ซึ่งเป็นน้ำมันหรือของเหลวความดันสูง (High Pressure) ที่จะสามารถกดแผ่นโลหะให้ติดกับพื้นที่ในขณะที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งเป็นการลดความฝืดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ของเหลวที่อยู่ภายในชุดแม่พิมพ์จะไหลอยู่ระหว่างผิวด้านล่างของชุดแม่พิมพ์กับแผ่นโลหะ ซึ่งจะทำให้หน้าที่ในการต้านทานแรงกดของพื้นที่ในขณะที่ทำการขึ้นรูป และสารหล่อลื่นทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานในขณะที่ปฏิบัติงาน ค่าของขีดจำกัดของอัตราการลากขึ้นรูป (Limit Drawing Ratio: LDR) ของแผ่นโลหะนั้นจะเพิ่มขึ้น และเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงาน ตามรูปที่ 2.9 แสดงถึงกระบวนการ Sheet Hydroforming ในกรรมวิธีของ Hydrodynamic Deep Drawing (HDD)

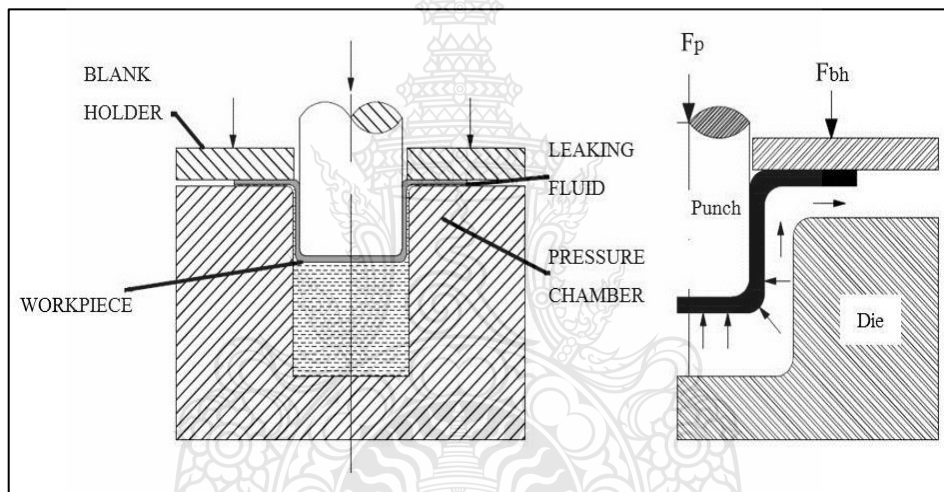


รูปที่ 2.9 การลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ [18]

ของเหลวสามารถนำมาใช้กับ Punch, Die หรือนำเข้ามาช่วยในการพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นโลหะ ในการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยลดความเสียดทานในกระบวนการ Sheet Hydroforming สามารถแยกออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ กระบวนการที่แม่พิมพ์เป็นตัวเคลื่อนที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Active Sheet Hydroforming) กับ กระบวนการที่แม่พิมพ์อยู่กับที่แต่ของเหลวทำหน้าที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ (Passive Sheet Hydroforming) วัสดุต่างๆ สามารถนำกระบวนการนี้เข้ามาใช้ได้อย่างมากมาย เช่น อะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum Alloy) แมกนีเซียมอัลลอย (Magnesium Alloy) และ ไททาเนียมอัลลอย (Titanium Alloy) เป็นต้น หรืออาจกล่าวได้ว่าวัสดุที่ใช้กระบวนการปั๊มขึ้นรูป (Stamping) ได้ ก็จะสามารถใช้กระบวนการ Sheet Hydroforming ได้เช่นกัน โดยความแตกต่างอยู่ที่ กระบวนการ Sheet Hydroforming ใช้ของเหลวแรงดันสูงอยู่ภายในแม่พิมพ์ประมาณ 30 ถึง 150 MPa แต่การทำงานที่แรงดันสูงถึง 200 MPa ก็มีอยู่เช่นกัน [18]

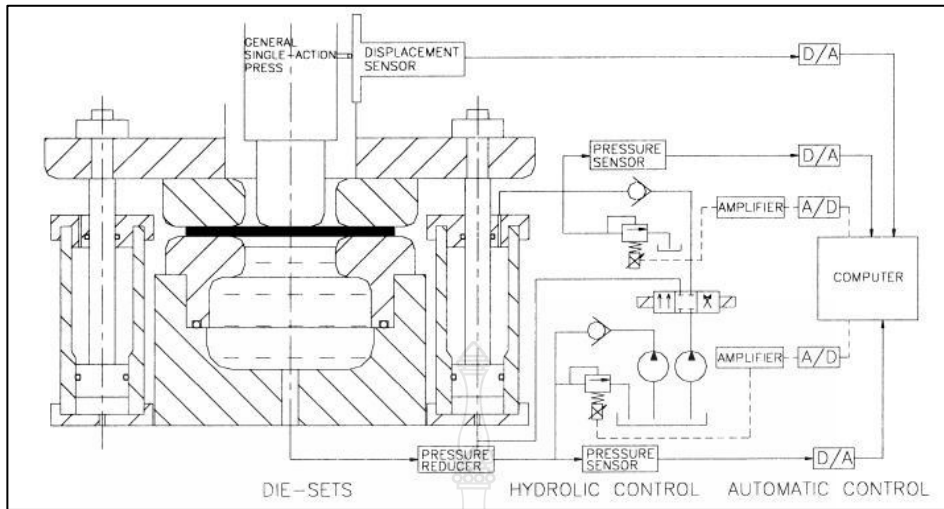
5. การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือพลศาสตร์ของไหล

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวนั้น ของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วตามที่กำหนด และไหลออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วสูง การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันของเหลวในการไหลออกจากแม่พิมพ์นั้น เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ลงของพื้ในจังหวะของการลากขึ้นรูป สำหรับการควบคุมแรงดันของเหลวภายในระบบ สำหรับการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ไม่ได้มีความสำคัญมากนัก รวมไปถึงการใช้แผ่นยางก็ไม่มี ความจำเป็น ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างไปจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยเครื่องจักรกลของเหลว (Hydro Mechanical Deep Drawing) และ การลากขึ้นรูปลึกของของเหลว (Hydroforming Deep Drawing) [19]



รูปที่ 2.10 กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [19]

ระบบการทำงานและส่วนประกอบ ของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว แสดงในรูปที่ 2.11 โดยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1. ชุดแม่พิมพ์สำหรับการลากขึ้นรูปโดยออกแบบสำหรับการรองรับการเคลื่อนที่ของของเหลว (General Hydrodynamic Deep Drawing Die Sets) และ 2. ชุดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของการควบคุมระบบ (Hydraulic Control) และ ชุดควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control) [2]



รูปที่ 2.11 ส่วนต่างๆของระบบ Hydrodynamic Deep Drawing [2]

6. แรงกดพื้นที่กระทำต่อวัสดุแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว สำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ไม่สามารถที่จะพิจารณาแรงในการลากขึ้นรูปเพียงอย่างเดียวได้ เนื่องจากแรงลากขึ้นรูปที่คำนวณตามทฤษฎีการลากขึ้นรูป หรือการวัดค่าแรงจากการทดลองนั้น เป็นแรงกดพื้นที่โดยรวม (Total Punch Forces ; TPF) เนื่องจากภายในกระบวนการมีแรงดันของเหลวอยู่ภายใน เป็นแรงที่คอยต้านการเคลื่อนที่ลงของพunch นั้นคือแรงที่ทำให้แรงกดพื้นที่ (Sheet Drawing Forces ; SDF) ที่กระทำต่อวัสดุแผ่นลดลง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงแรงกดพื้นที่ที่กระทำโดยตรงต่อวัสดุแผ่น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 [20]

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

เมื่อ	f_D	คือ	แรงกดพื้นที่ที่กระทำโดยตรงต่อวัสดุแผ่น
	f_p	คือ	แรงกดพื้นที่โดยรวม
	d_p	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางของพunch
	P_s	คือ	แรงดันของเหลว

7. กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น (Fluid Mechanics)

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

1) กฎพื้นฐานทางฟิสิกส์

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

ก. กฎอนุรักษ์มวลของสาร (Conservation of Mass) “ในกรณีที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือมีผลของทฤษฎีสัมพัทธ์ มวลของสารก้อนหนึ่งย่อมคงที่” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุมย่อมเท่ากับอัตราสุทธิของมวลที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม” อัตราสุทธิของการไหลเข้าหมายถึง 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

ก. กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น (Conservation of Momentum) “โมเมนตัมของมวลก้อนหนึ่งย่อมคงที่อยู่เช่นนั้น (โมเมนตัมของก้อนมวลคือมวลคูณด้วยความเร็ว, $M\vec{V}$) จนกว่าจะมีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งในกรณีนี้อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเท่ากับแรงที่มากระทำนั้น” ซึ่งหมายถึงกฎข้อที่สองของนิวตันนั่นเอง ($F = Ma$) หรือกล่าวในทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม ในครึ่งแรงของบัญญัตินี้ก็คือกฎข้อที่สองของนิวตันในระบบติดตามมวล เพราะโมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุมย่อมเปลี่ยนด้วยแรงที่มากระทำต่อปริมาตรควบคุมในขณะเวลานั้น แต่ในระบบอาจมีการไหลเข้าออกของโมเมนตัมผ่านพื้นที่ผิวด้วย เรียกว่าโมเมนตัมฟลักซ์ ซึ่งโมเมนตัมฟลักซ์นี้ไหลเข้าออกปริมาตรควบคุม พร้อมกับ การไหลเข้าออกของมวลนั่นเอง ดังนั้น โมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุม จึงอาจเปลี่ยนไปได้ เพราะปริมาณสุทธิของโมเมนตัมฟลักซ์ ที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมอีกโสดหนึ่งด้วย

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

กฎนี้หรือกฎอื่นใดก็ตาม บัญญัติเฉพาะที่เวลาใดๆ เวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นแรงก็คือแรงที่กระทำ ณ เวลานั้นๆ และอัตราการไหลเข้าออกก็คืออัตรา ณ เวลานั้น

หากเปรียบเทียบกับกฎอนุรักษ์มวล ได้หลีกเลี่ยงการใช้คำว่า “เพิ่มขึ้น” ในกรณีของโมเมนตัม 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” หรือกล่าวในทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัม

เชิงมุมในปริมาตรควบคุม ข่อมเท่ากับแรงบิดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม 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 ซึ่งมีคำนิยามคือ $\vec{h} = \vec{r} \times \vec{V}$ โดยที่ \vec{r} คือ เวกเตอร์พิกัด (Position vector)

จ. กฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) “อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของก้อนมวล ข่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนและกำลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ก้อนมวล” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุม ข่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อน และงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าปริมาตรควบคุมของพลังงาน”

สมการควบคุมการอนุรักษ์พลังงาน

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

เมื่อ e คือ พลังงาน
 Q_{CV} คือ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุม
 W_{CV} คือ งานจากสิ่งแวดล้อมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

2) สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid Static)

กฎสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กลศาสตร์เชิงสถิตยศาสตร์ ก็คือ กฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน ที่บัญญัติโดยนัยว่า “วัตถุที่ปราศจากการกระทำของแรงลัพธ์สุทธิจากภายนอกย่อมคงสภาพนิ่งอยู่กับที่ ดั้งเดิม หรือหากเดิมเคลื่อนที่อยู่ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วเดิมในทิศทางเดิม”[20]

ก. ค่าความดันที่จุดใดๆ (Pressure at a Point) ความดัน หรือแรงดัน คือ “แรงต่อหน่วยพื้นที่ ในเนื้อของไหลที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ที่พิจารณา” ซึ่งต่างจากแรงเฉือน (Shear Force) ที่นิยามว่าเป็น “แรงต่อหน่วยพื้นที่ที่กระทำในแนวขนานกับพื้นที่ที่พิจารณา” ตามกฎของนิวตัน “แรง” ไม่อาจเกิดขึ้นได้ลอยๆ ด้วยตัวของมันเอง ดังนั้นที่ผิวของอุปกรณ์ที่สัมผัสของไหลอยู่ก็เช่นเดียวกัน เช่น ผิวเครื่องบิน รถยนต์ เรือ หรือแม้แต่ผิวหนังของเรา แรงดันก็คือแรงต่อหน่วยพื้นที่ และแรงจะเกิดขึ้นลอยๆไม่ได้ แต่การเกิดแรงต้องขึ้นอยู่กับกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งตามกฎดังกล่าว แรงต้องเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่านั้นดังสมการ

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

หรือในทางกลับกัน โมเมนตัมเปลี่ยนแปลงได้เพราะมีแรงกระทำเท่านั้น

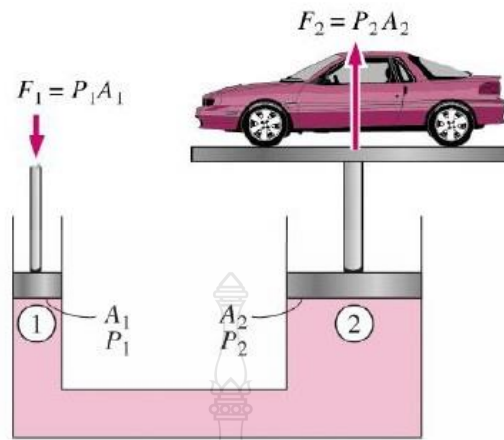
ข. แรงดันในของไหล แรงดันของของเหลวที่กระทำ ณ ส่วนใดๆ จะมีค่าเท่ากันทุกจุด โดยที่ยังไม่คิดน้ำหนักของของไหล ในความเป็นจริงจะเห็นว่า ความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่ามากกว่าบนภูเขา และความดันของน้ำใต้ท้องทะเลลึกจะสูงกว่าที่ระดับน้ำทะเล ความดันของน้ำทะเลเพิ่มขึ้นตามความลึก ยิ่งลึกมากความดันก็จะยิ่งมาก เป็นเพราะว่าของไหลมีน้ำหนักนั่นเอง 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 ความดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังทุกๆจุดในของเหลวนั้น” กฎของปาสคาลใช้ในการอธิบายหลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก



รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยใช้กฎของปาสคาล [6]

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

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 โดยสมมุติฐานของไหลเป็นของในอุดมคติ (Ideal Fluid) ของไหลในอุดมคติ หมายถึง ของไหลที่ถูกสันนิษฐานว่าเป็นของไหลที่ไม่มี ความหนืด ดังนั้นการไหลของของไหล แบบนี้ จึงไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างชั้นของของไหลหรือระหว่างของไหลกับผิวสัมผัส การไหลของของไหลในอุดมคติ จะไม่มีเทอมของการไหลวน (Eddy Formation) หรือการสูญเสียพลังงานอันเกิดเนื่องจากแรงเสียดทาน สมมุติฐานนี้ สามารถทำให้พิจารณาการเคลื่อนตัวของของไหลเหมือนกับการเคลื่อนตัวของของแข็งบนแผ่นที่ไม่มีแรงต้านทาน ดังนั้นอาจจะพิจารณาแรงต่างๆที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ โดยความเร่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน [22]

2.2.2 การควบคุมระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System Control)

ระบบไฮดรอลิก หมายถึง การไหลของของเหลวทุกชนิดที่ใช้ในระบบเพื่อเป็นตัวกลางการถ่ายเทกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล ในระบบไฮดรอลิกทั่วไปจะต้องมีอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานดังต่อไปนี้ [23]

1. อุปกรณ์ต้นกำลังไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนปั้มน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อส่งจ่ายให้แก่ระบบไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า
2. อุปกรณ์เก็บและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นที่พักของน้ำมัน ขจัดสิ่งสกปรก ขจัดฟองอากาศ และระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยถังพักน้ำมันไฮดรอลิก ไล์กรองน้ำมันไฮดรอลิก และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆที่ใช้กับถังพักน้ำมัน
3. อุปกรณ์สร้างการไหล ทำหน้าที่สร้างอัตราการไหล ประกอบด้วยปั้มไฮดรอลิกชนิดต่างๆ
4. อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน หมายถึงวาล์วควบคุมชนิดต่างๆในระบบไฮดรอลิก เช่น วาล์วควบคุมทิศทางการไหลใช้ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ขงก้านสูบ วาล์วควบคุมอัตราการไหลใช้จำกัดปริมาณน้ำมันที่ไหลเข้าสู่ลูกสูบเพื่อควบคุมความเร็วของก้านสูบ วาล์วควบคุมความดันใช้ควบคุมความดันในระบบ
5. อุปกรณ์การทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล เช่น กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก
6. อุปกรณ์ในระบบท่อทาง ทำหน้าที่เป็นท่อทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบ ประกอบไปด้วย เป๊ป (Pipe) ท่อ (Tube) สายน้ำมันไฮดรอลิก (Hoses) ข้องอ (Bending) และข้อต่อชนิดต่างๆ (Fittings)

2.2.3 น้ำมันแร่หรือน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil)

น้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทแรงอัดไปยังส่วนต่างๆของระบบ หล่อลื่นปั้มและแบร์ริงตลอดจนทำหน้าที่เป็นซีล และช่วยระบายความร้อน น้ำมันไฮดรอลิกที่ดียังจะต้องมีสารป้องกันการเกิดฟอง ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันป้องกันสนิมและการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังต้องสามารถแยกตัวจากน้ำได้ดี ในระบบไฮดรอลิกขนาดใหญ่แบบเก่าอาจใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทดกำลังแต่น้ำไม่สามารถทำหน้าที่หล่อลื่นได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสนิม น้ำมันไฮดรอลิกในปัจจุบันประกอบด้วย น้ำมันแร่พวกที่มีค่าดัชนีความหนืดสูง (HVI) ผสมด้วยสารเพิ่มคุณภาพเพื่อป้องกันการสึกหรอ ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันป้องกันสนิม และการกัดกร่อนป้องกันการเกิดฟองและไม่รวมตัวกับน้ำถ้าหากอุปกรณ์ไฮดรอลิก ติดตั้งในบริเวณใกล้กับเปลวไฟ หรือหากเกิดไฟไหม้แล้วจะทำให้เกิด

ความเสียหายมาก เช่น ในเครื่องบิน หรือในอุตสาหกรรมบางประเภท น้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้มักเป็นของเหลวชนิดไม่ติดไฟ ซึ่งอาจเป็นสารละลายน้ำพวกไกลคอล (Glycol) หรือเป็นพวกสารสังเคราะห์ เช่น คลอรีเนตเต็ดฟลูโอไฮโดรคาร์บอน หรือพวกฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น [23]

1. หน้าที่หลักของน้ำมันไฮดรอลิก

1) การส่งผ่านกำลัง (Power Transmission) น้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งในระบบ เพื่อเปลี่ยนแปลงกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล ซึ่งถ้าจะให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว น้ำมันไฮดรอลิกที่ไหลในท่อทางหรือไหลผ่านวาล์วควบคุมต่างๆจะต้องไหลไปได้อย่างราบรื่น แต่ถ้าเกิดความต้านทานการไหลมากก็จะทำให้กำลังงานสูญเสียไป และน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องไม่ยุบตัวตามความดันในขณะที่ทำงาน เช่น เมื่อปั๊มทำงานดูดอัดเพื่อส่งน้ำมันไปยังท่อทาง วาล์วเลื่อนทำงาน และในขณะที่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกำลังทำงานขับโหลด

2) การหล่อลื่น (Lubrication) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ เช่น ชิ้นส่วนของปั๊ม มอเตอร์ไฮดรอลิก ลูกสูบ กระบอกสูบ แกนวาล์ว และส่วนประกอบต่างๆที่มีการเคลื่อนที่ โดยที่น้ำมันไฮดรอลิกจะมีสภาพเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ กั้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เสียดสีกันทั้งในขณะที่ระบบทำงาน และหยุดนิ่ง ฟิล์มน้ำมันไฮดรอลิกจะช่วยให้การหล่อลื่นเพื่อลดการเสียดสีของผิวสัมผัส แผ่นฟิล์มของน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องมีความหนืดพอเหมาะที่จะแทรกซึมเข้าไปในรูเล็กๆ และรอยต่อของชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ และสามารถรับน้ำหนักของวัตถุที่กดทับหรือรับแรงกดอยู่ได้ ซึ่งสมบัติดังกล่าวเรียกว่า ความแข็งแรงของฟิล์ม (Film Strength) นอกจากนี้ น้ำมันไฮดรอลิกยังควรมีสมบัติในการลื่นไหลได้ดีด้วย กล่าวคือ ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกเป็นฟิล์มยึดติดกับชิ้นส่วนใดก็สามารถจะลื่นไหลไปกับชิ้นส่วนนั้นๆ และช่วยให้เคลื่อนไปได้อย่างคล่องตัวด้วย สมบัติข้อนี้เรียกว่า ความลื่น (Lubricity)

3) การซีล (Sealing) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นซีลด้วยเพื่อให้มีการรั่วซึมเกิดขึ้นน้อยที่สุด ภายในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกเมื่อมีความดันเกิดขึ้น การซีลนี้จะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิด

4) การระบายความร้อน (Cooling) การไหลเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบขณะการทำงานจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานในระบบ ความร้อนนี้ก็จะถูกพาไปโดยน้ำมันและไหลลงสู่ถังพัก แล้วแผ่กระจายความร้อนผ่านผนังของถังพักได้

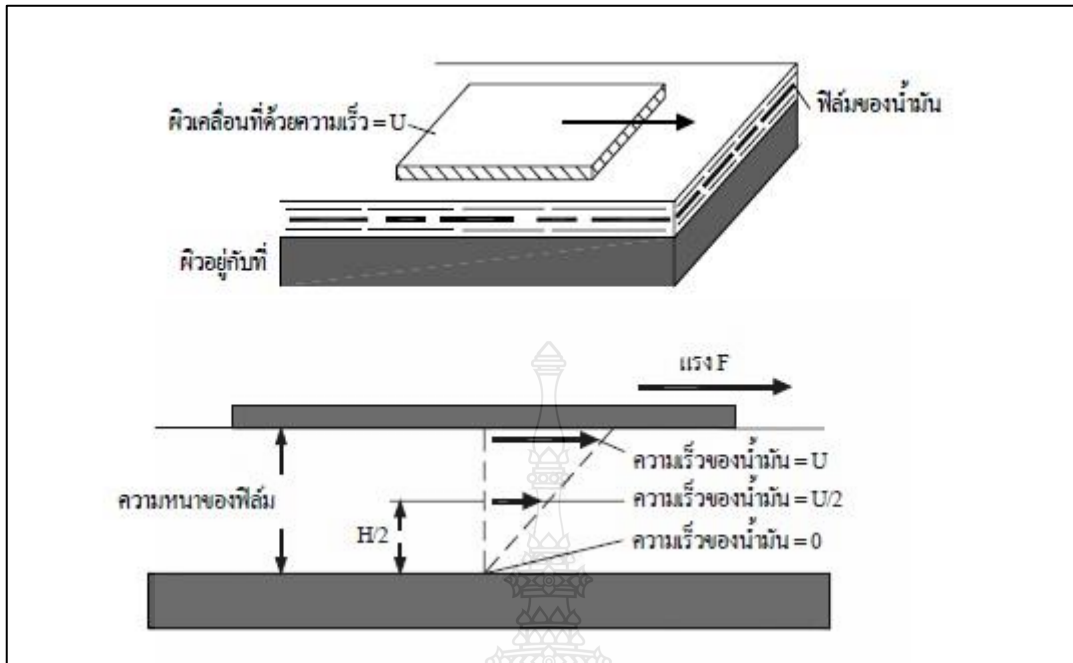
2. สมบัติความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันไฮดรอลิกและของเหลว [24]

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส ความหนืดคือความข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่ฟิล์มหล่อลื่นก็บางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความข้นสูงยอมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มหล่อลื่นหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความข้นต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบและอุณหภูมิที่วัดก็ต่างหาก ซึ่งอาจสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน [24]

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 และ 200 องศาฟาเรนไฮต์
4. เยอรมันและประเทศในยุโรป	อิงเลอร์ (Engler Degree; E.)	20, 50 และ 100 องศาเซลเซียส

หลักการวัดค่าของความหนืดตามที่แสดงในรูปที่ 2.14 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ที่ผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นหลายๆชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุด และล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรงที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)



รูปที่ 2.13 หลักการของความหนืด [24]

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

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

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

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

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

เมื่อ

ν = ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (สโตก)

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (พอยส์)

ρ = 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)[23]

สมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก เป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยในการตัดสินใจคุณภาพและอายุการใช้งาน และสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ ความต้านทานการเกิดสนิม (Oxidation Resistance) เพราะของเหลวทั่วไปมักจะเกิดสนิมง่ายทำให้อายุการใช้งานสั้นลง การเกิดสนิมของน้ำมันไฮดรอลิกเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันกับอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดสารใหม่ นอกเหนือไปจากส่วนประกอบอื่นๆปะปนอยู่ในน้ำมัน ทำให้น้ำมันมีสีเข้มขึ้นและเหนียวขึ้น นอกจากนี้สารประกอบบางอย่างที่ละลายออกมาอาจมีสมบัติเป็นกรด ซึ่งจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะภายในระบบ สำหรับสารประกอบประเภทขี้ผึ้งที่ปะปนอยู่ในน้ำมันนั้น เมื่อได้รับความร้อนก็จับตัวกันเป็นก้อนยางเหนียว ซึ่งอนุภาคของสารนี้จะลอยปะปนหมุนเวียนอยู่ภายในระบบด้วย นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆที่เกิดจากสนิมจับตัวกลายเป็นสภาพน้ำมันขี้ผึ้ง เมื่อปะปนกับวงโลหะก็จะทำให้เกิดปัญหาในระบบเช่น ทำให้อุปกรณ์ต่างๆติดขัดจากการอุดตัน การที่น้ำมันในระบบเกิดสนิมมากขึ้น เนื่องมาจากสาเหตุหลายประการคือ

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

2) ปริมาณอากาศ ในขณะที่ระบบไฮดรอลิกทำงานจะมีอากาศปะปนอยู่ทั่วไป ซึ่งจะทำให้เกิดสนิมเพราะเมื่อเครื่องจักรหยุดการทำงาน อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำมันก็จะแยกตัวออกไปและทำ

ปฏิกิริยากับผิวโลหะ ที่เป็นเช่นนี้เพราะในสภาพความดันบรรยากาศปกติ น้ำมันไฮดรอลิกจะดูดซึมอากาศได้ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของอากาศทั้งหมด

3) ปริมาณสิ่งสกปรกและฝุ่นผงที่ปะปนอยู่ในระบบ สิ่งสกปรกต่างๆ เช่น ฝุ่นละออง จารบี น้ำ และพวกเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอเนื่องจากการทำงาน โดยเฉพาะพวกเศษทองแดงและทองเหลือง สิ่งต่างๆเหล่านี้เป็นเสมือนตัวเร่งที่ทำให้เกิดสนิมและความสกปรกอย่างมาก

2.2.4 สมบัติเชิงกลของโลหะ [25]

1. ความเค้น (Stress)

ความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสอดคล้องกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

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

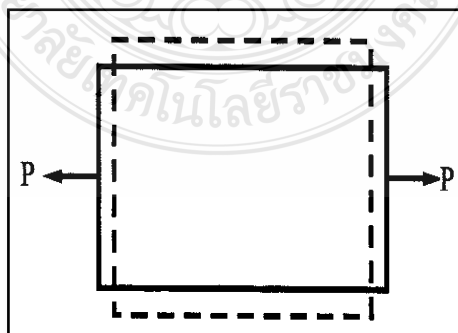
เมื่อ σ คือ ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m²) หรือ kgf/mm²

P คือ แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m² หรือ mm² หรือ

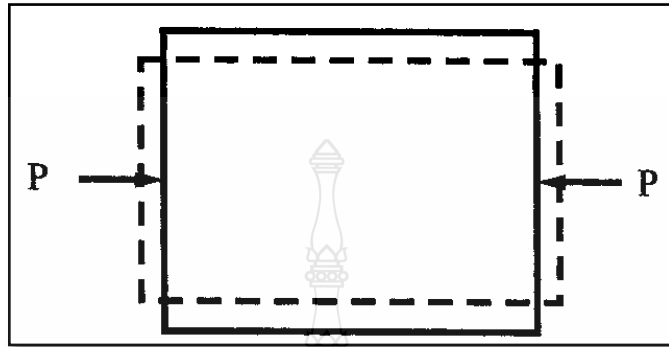
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำโดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆ กัน

1) ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.14



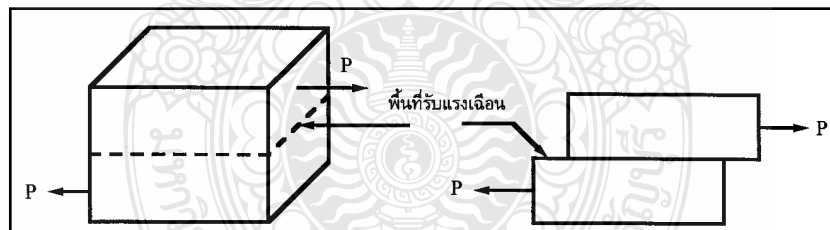
รูปที่ 2.14 แรงดึง (Tensile) [26]

2) ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แรงกด (Compression) [26]

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



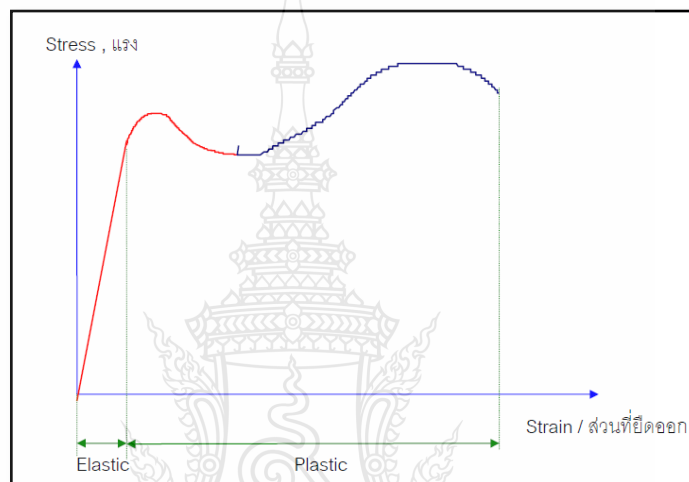
รูปที่ 2.16 แรงเฉือน (Shear) [26]

2. ความเครียด (Strain)

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

1) การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

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



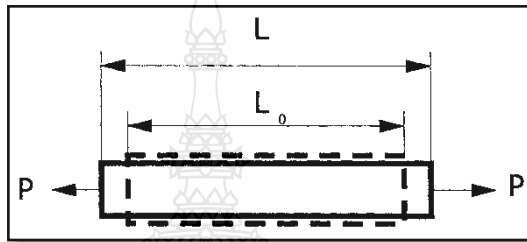
รูปที่ 2.17 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ [27]

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งยืดหยุ่นจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การคำนวณหาความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

ก. แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 2.18 ค่าของความเครียดจะเท่ากับ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

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

เมื่อ e = ความเครียดเชิงเส้น
 ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L - L_o$)
 L_o = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length

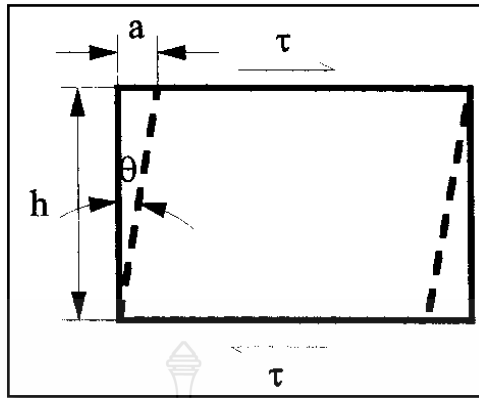


รูปที่ 2.18 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) [26]

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

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

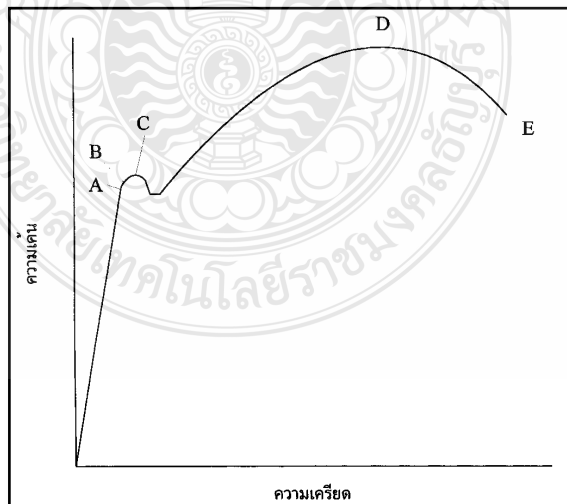
เมื่อ γ = $\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่มุมเล็ก)
 a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)
 h = ระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ = มุมที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.19 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) [26]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

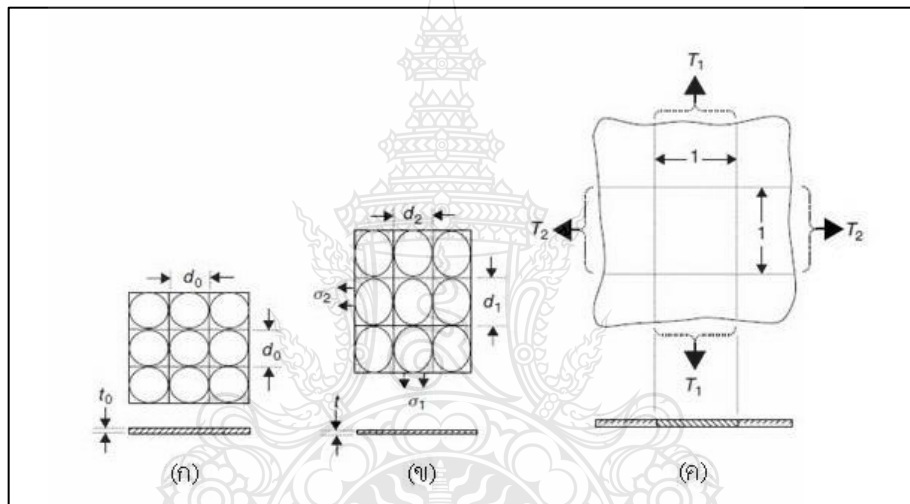
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 2.20 การทดสอบแรงดึงนอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [27]

2.2.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะแผ่น

การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane Stress) พิจารณา (Work Hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปใน รูปที่ 2.21 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 แสดงในรูปที่ 2.21 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.21 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณีแสดงดังรูปที่ 2.21 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [13,25]

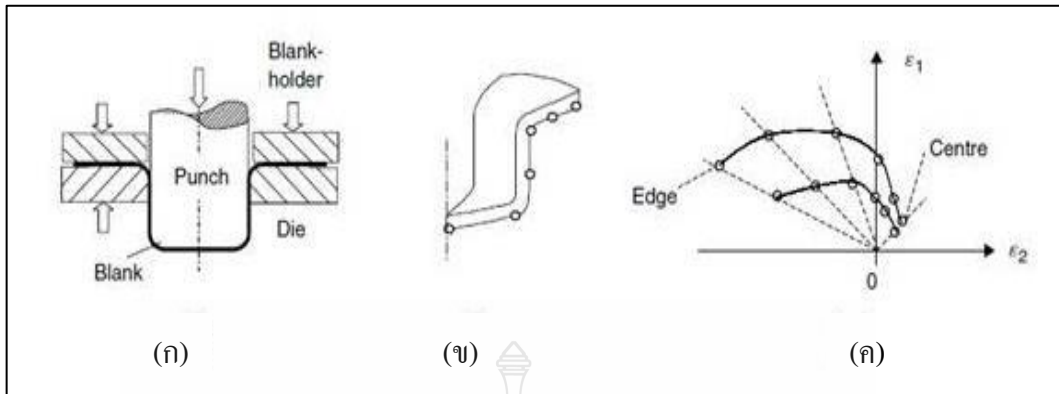


(ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปเป็นรูปวงรี (ค) แรงดึงในทิศทาง

รูปที่ 2.21 ตารางวงกลมบนโลหะแผ่น [13]

2.2.6 แผนภาพความเครียด (Strain Diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.23 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมแบบรูปที่ 2.22



(ก) การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก (ข) ขึ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้
 (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก

รูปที่ 2.22 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก [13]

1. ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

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

2. อัตราส่วนของความเครียด (Strain Ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

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

3. ความเครียดหนาและความหนา (Thickness Strain and Thickness)

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

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

จากสมการ 2.26 ความหนาโดยทั่วไปคือ

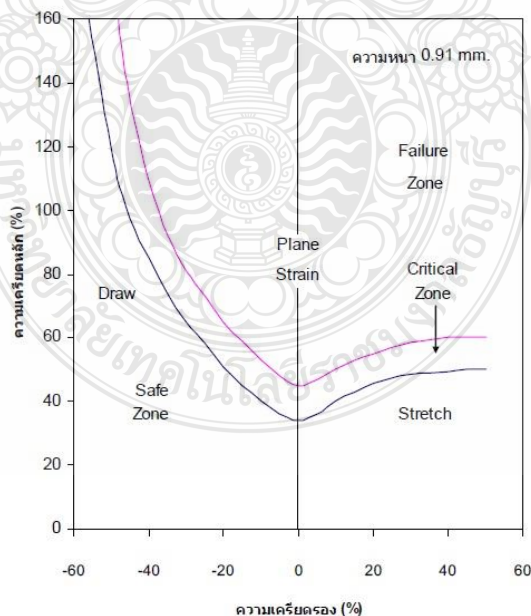
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.34)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่

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

2.2.7 แผนภาพความเครียด (Strain diagram)

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



รูปที่ 2.23 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm. [25]

สำหรับความเครียดในตำแหน่งของการคอดขยาย (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 $\rho = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$; ซึ่งความเครียดในตำแหน่งซึ่งตรง หรือความเครียดจากการดึง 2 ทิศทางเท่ากับ 1

2.2.8 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Metal)

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก คือ โลหะและโลหะผสมทุกชนิดที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ได้แก่ ดีบุก อะลูมิเนียม สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ทองคำ เงิน ทองคำขาว พลวง แมกนีเซียม เป็นต้น

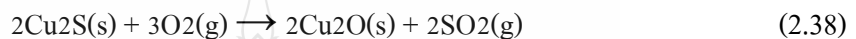
1. ทองแดง (Copper) ทองแดงอยู่ในตารางธาตุหมู่ 29 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำ โดยมนุษย์รู้จักทองคำเมื่อประมาณ 4000 ปีก่อนคริสตกาล การถลุงทองแดงจากแร่ชั้นแรกคือการแยกแร่ที่ต้องการออกจากสิ่งเจือปนหรือ กากแร่อาจใช้วิธีการลอยตัว โดยนำแร่ที่บดละเอียดแล้วผสมเข้ากับน้ำ น้ำมันและสารซัลไฟในถังผสม จากนั้นควันและผ่านอากาศเข้าไปในของเหลวที่อยู่ในถังผสมตลอดเวลา เพื่อให้มีฟองเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ฟองอากาศ และน้ำมันไปเกาะอยู่กับอนุภาคของแร่และลอยตัวอยู่ด้านบน ส่วนกากแร่จะจมลงอยู่ด้านล่าง เมื่อตักฟองที่ลอยอยู่ด้านบนออกและทำให้แห้งจะได้ผลแร่ที่มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15 โดยมวล ขึ้นต่อไปน้ำแร่มาเผาในอากาศเรียกกระบวนการนี้ว่า การย่างแร่ ไอร์ออน(II)ซัลเฟตบางส่วนจะถูกออกซิไดส์เป็นไอร์ออน(II)ออกไซด์ ดังสมการ



กำจัดไอร์ออน(II)ออกไซด์ออกไป โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเผาพร้อมกับออกไซด์ของซิลิคอนในเตาถลุงอุณหภูมิประมาณ 1100 °C ไอร์ออน(II)ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิคอนได้กาคะกอนเหลวซึ่งแยกออกมาได้ ดังสมการ



ส่วนคอปเปอร์(II) ซัลไฟด์เมื่ออยู่ในที่มีอุณหภูมิสูงจะสลายตัวได้เป็นคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์ในสถานะของเหลวซึ่งสามารถแยกออกได้ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อแยกคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์ในอากาศ บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์(I)ออกไซด์ดังสมการ



และคอปเปอร์(I)ออกไซด์กับคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากัน โดยมีซัลไฟด์ไอออนทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ได้โลหะทองแดงและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการ



ทองแดงที่ถูกละได้ในขั้นตอนนี้ยังมีสิ่งเจือปนจึงต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ก่อน การทำทองแดงให้บริสุทธิ์โดยทั่วไปจะใช้วิธีแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า ทองแดงสามารถตัดได้ง่าย จึงใช้แพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น สายลวดทองแดง ท่อน้ำทองแดงลูกบิด และของอื่นๆ ที่ติดตั้งในบ้าน เครื่องจักรไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ไฟฟ้า และสวิตช์ไฟฟ้า หลอดสุญญากาศ หลอดรังสีแคโทด (Cathode Ray Tube) และแมกนีตรอนในเตาอบไมโครเวฟ หลอดนำคลื่นไฟฟ้า (Wave Guide) สำหรับรังสีไมโครเวฟ

2. ทองเหลือง (Brass) คือ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายได้ในทองแดงในรูปของสารละลายของแข็ง (Solid Solution) คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานการกัดกร่อน และมีความสามารถในการขึ้นรูปและคุณสมบัติอื่นๆ ตลอดจนสีของทองเหลืองเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม ทองเหลืองที่ใช้งานในทางวิศวกรรม จะมีปริมาณสังกะสีไม่เกิน 40% เนื่องจากหากมีสังกะสีมากเกินไปจะทำให้ทองเหลืองมีความเปราะมากขาดความเหนียว จึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองต่างๆไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่ม คือ ประเภทรีดเป็นแท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrought Copper Alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast Copper) ซึ่งทั้งสอง

กลุ่มจะแยกชั้นคุณภาพ ในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกล มักจะกล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักและใช้งานกันอยู่เป็นประจำซึ่งมีอยู่ไม่มากนัก โดยแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังต่อไปนี้

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

2) Alpha Brasses (Prince's Metal) ประกอบด้วยสังกะสีน้อยกว่า 35% ทองเหลืองชนิดนี้สามารถตีเป็นแผ่นได้ เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิต่ำ

3) Low Brass เป็นโลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี มีสังกะสี 20% มีสีทองอ่อนๆ สามารถทำให้เป็นเส้นบางๆ ได้ดีเยี่ยม ใช้ทำท่อส่งน้ำ/แก๊สที่ขัดหยุ่นสูง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ในปี 2000 Kang Dachang [1] ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง A Study on Hydrodynamic Deep Drawing Equipment โดยทำการศึกษาวิจัยถึงการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ชุดแม่พิมพ์ (Die Set), 2. ชุดควบคุมไฮดรอลิก (Hydraulic Control) และ 3. ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Automatic Control) โดยการศึกษาวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า ชุดแม่พิมพ์ในกระบวนการ HDD เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียว มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบ HDD ลักษณะของการกดยึดแผ่นโลหะในรายงานฉบับนี้เป็นโครงสร้างและทฤษฎีใหม่ที่มีการออกแบบขึ้น เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้ด้วยเครื่องจักรกลต่างๆ ได้มากมาย แรงดันของของเหลวภายในระบบของการทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ลดแรงดัน (Pressure Reducer) ในปี 2000 Kang Dachang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง A Study on Hydrodynamic Deep Drawing Equipment [1] โดยทำการศึกษาวิจัยถึงการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ชุดแม่พิมพ์ (Die Set), 2. ชุดควบคุมไฮดรอลิก (Hydraulic Control) และ 3. ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Automatic Control) โดยการศึกษาวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า ชุดแม่พิมพ์ในกระบวนการ HDD เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียว มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบ HDD ลักษณะของการกดยึดแผ่นโลหะในรายงานฉบับนี้เป็นโครงสร้างและทฤษฎีใหม่ที่มีการออกแบบขึ้น เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้ด้วยเครื่องจักรกลต่างๆ ได้มากมาย แรงดันของของเหลวภายในระบบของการทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ลดแรงดัน (Pressure Reducer)

2.3.2 ในปี 2004 Lihui Lang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง A Study on Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto The Blank [2] โดยทำทดลองขึ้นรูปอลูมิเนียมผสมเกรด A116016-T4

โดยใช้กระบวนการ Hydromechanical Deep Drawing (HDD) ทำการขึ้นรูปด้วยที่มีอัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing Ratio) 2.46 และ 3.11 กับ อลูมิเนียมอ่อนเกรด A11050-H0 อัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing Ratio) 3.11 ศึกษาวิจัยถึงแรงดันของของเหลวที่กระจายตัวกระทำต่อ โลหะแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป แล้วทำการจำลองการขึ้นรูปโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจริง โดยการกำหนดตัวแปรของวัสดุและตัวแปรของอุปกรณ์ สรุปได้ว่า อลูมิเนียมอัลลอย ซึ่งมีความแข็ง ขึ้นรูปได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.46 และจะเกิดรอยย่นที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.54 ส่วน อลูมิเนียมอ่อนสามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 3.11 และได้ผิวงานที่เรียบ ในส่วนของการจำลองการขึ้นรูปด้วย FEM ขอบเขตของสภาวะต่างๆ จำเป็นต้องชัดเจน สมบัติ Anisotropy ของวัสดุเป็นตัวแปรสำคัญในการจำลองถึงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่น โลหะ

2.3.3 ในปี 2004 Lihui Lang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Investigation The Effect of Pre-Bulging During Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto The Blank [3] โดยทำการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบจากการพองตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการ Hydromechanical Deep Drawing (HDD) โดยเป็นการศึกษาทดลองต่อเนื่อง ชิ้นงานวิจัยของ Lihui Lang ยังใช้อลูมิเนียมเกรด A116016-T4 และ A11050-H0 ในการศึกษาวิจัย สรุปได้ว่า การพองตัวหรือรอยย่นมีตัวแปร 2 อย่าง คือ ความดันของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) และ ความสูงของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) โดยการเพิ่มอัตราส่วนการลากขึ้นรูปจะทำให้เกิดความดันของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) และ ความสูงของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) อย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากความแปรปรวนของแรงดันของเหลวภายใน สรุปได้ว่า สารหล่อลื่นที่ค้ำระหว่างแผ่นโลหะกับ Blank Holder และแม่พิมพ์ เป็นตัวช่วยอย่างมากในการปรับปรุงอัตราส่วนการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่น สำหรับความเสียดทานระหว่างแผ่นโลหะกับ Punch เป็นอีกตัวแปรหนึ่งเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งเป็นลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แต่จะไม่ส่งผลต่อการขึ้นรูปมากนัก ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังกล่าวมีค่าที่ไม่มากนัก

2.3.4 ในปี 2004-2005 Lihui Lang ยังคงทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่องโดยในปี 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 [12] โดยเป็นการศึกษาวิจัยถึงการเตรียมการ, การสังเกต, การวิเคราะห์เชิงตัวเลข และ ตัวแปรในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) เป็นวัสดุในการทดลอง สรุปได้ว่า อลูมิเนียมอัลลอย A16016-T4 สามารถขึ้นรูปได้ดีที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูป 2.46 และกระบวนการที่ดีที่สุดของการขึ้นรูปครั้งนี้

คือ ระยะห่างระหว่าง Blank Holder กับ แม่พิมพ์ คือ 0.98 ถึง 1.035 ของความหนาแผ่น โลหะ ความดันของเหลวภายในอยู่ที่ประมาณ 325 bar

2.3.5 ในปี 2005 Lihui Lang ยังคงทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่อง โดยในปีนี้ Lihui Lang ศึกษาวิจัย เรื่อง Investigation into The Forming of a Complex Cup Locally Constrained by a Round Die Based on Innovative Hydromechanical Deep Drawing Method [16] โดยทำการทดลองขึ้นรูปอลูมิเนียมผสมเกรด คือ APP211 และ เหล็กอ่อนเกรด DC06 เป็นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมซึ่งมีความโค้งของของมุม ด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ทำการศึกษาวิเคราะห์ถึงความดันของของเหลวบริเวณรอบๆ แม่พิมพ์ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป สรุปได้ว่า เหล็กอ่อน (Soft Steel) มีอัตราการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ 3.53 และ อลูมิเนียมสูงสุดอยู่ที่ 3.44

2.3.6 ในปี พ.ศ. 2555 ธนสาร อินทรกำธรชัย ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ [28] เป็นการนำเสนอวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ เป็นกระบวนการขึ้นรูปอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ พบว่าชิ้นงานได้รับอิทธิพลความแตกต่างกันของคุณสมบัติตามแนวการรีด ส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางที่สั้นที่สุดมีขนาด 285 มม. และเส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดในแนว 45 ของเส้นที่สั้นมีขนาด 289 มม. ในขณะที่ผลการจำลองให้เส้นผ่าศูนย์กลางที่สั้นที่สุดมีขนาด 284.15 มม. และยาวที่สุดมีขนาด 288.5 มม. โดยความสูงของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบจริงมีความสูง 107 มม. ส่วนการจำลองมีความสูง 105 มม. และด้วยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดทั้งผลการทดสอบจริงและผลการจำลองแสดงถึงการเกิดรอยย่นที่ ผนังอย่างชัดเจน

2.3.7 พ.ศ. 2555 กฤษณา บรรเทาพิช ทำการศึกษาเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [5] พบว่า แรงดันของเหลวและแรงกดชิ้นงานเป็นตัวแปรที่สำคัญและมีผลกระทบต่อกระบวนการลากขึ้นรูปมากที่สุด โดยแรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อแรงดันของเหลวและแรงกดชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 68 mm²/s แรงดัน 100 bar แรงกดชิ้นงาน 3.9 kN มีแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 56.89 kN การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 46 mm²/s ที่แรงดัน 100 bar แรงกดชิ้นงาน 3.9 kN มีแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 70.73 kN ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 32 mm²/s ที่แรงดัน 100 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 3.9 kN ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้

2.3.8 พ.ศ. 2555 สุริยา น้ำแก้ว ทำการศึกษาเรื่อง อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก [8] ใช้แรงลากขึ้นรูปและใช้แรงกดพื้นที่สูงที่สุดมากกว่าการลากขึ้น

รูปแบบปกติ โดยในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป ส่วนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนา ค่าเฉลี่ย 3.58 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดหลัก ค่าเฉลี่ย 14.06 เปอร์เซ็นต์ และความเครียดรอง ค่าเฉลี่ย 8.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความเครียดเฉลี่ยน้อยกว่าชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการการเคลื่อนที่ของของเหลวความดันสูง (Hydrodynamic Deep Drawing) และศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 2 ชนิด คือ ทองแดง เกรด C1100 และทองเหลือง เกรด C2801 จากการศึกษาค้นคว้า ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้น พบว่าปัจจัยหลัก คือ แรงในการลากขึ้นรูป แรงกดแผ่นชิ้นงาน และแรงดันที่เกิดขึ้นภายในห้องบรรจุของเหลว นั้นมีอิทธิพลต่อการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ โดยพิจารณาจากความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน และปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังการขึ้นรูป คือ รอยย่นที่ปากถ้วยกับรอยฉีกขาด ทั้งหมดนี้มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมการทดลองวัสดุและอุปกรณ์

1. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ ทองแดง เกรด C1100 และ ทองเหลือง เกรด C2801 ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร



(ก) ทองแดง

(ข) ทองเหลือง

รูปที่ 3.1 แผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

2. น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เกรด ISO VG 68 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 68.98 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน มอก.977-2551 [6]



รูปที่ 3.2 น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เกรด ISO VG 68

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



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

รูปที่ 3.3 สปริงที่ใช้ในการทดลอง

4. เครื่องกัด CNC ชนิด 5 แกน สำหรับทำแผ่นทดสอบ



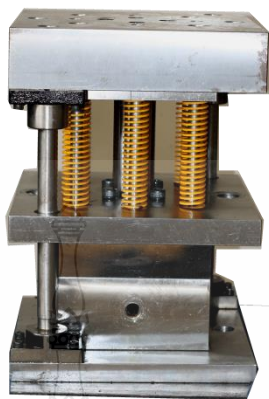
รูปที่ 3.4 รูปเครื่องกัด CNC ชนิด 5 แกน

5. เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน

6. ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิก รูปถ้วยทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิก

7. ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร แรงดันสูงสุด 700 บาร์



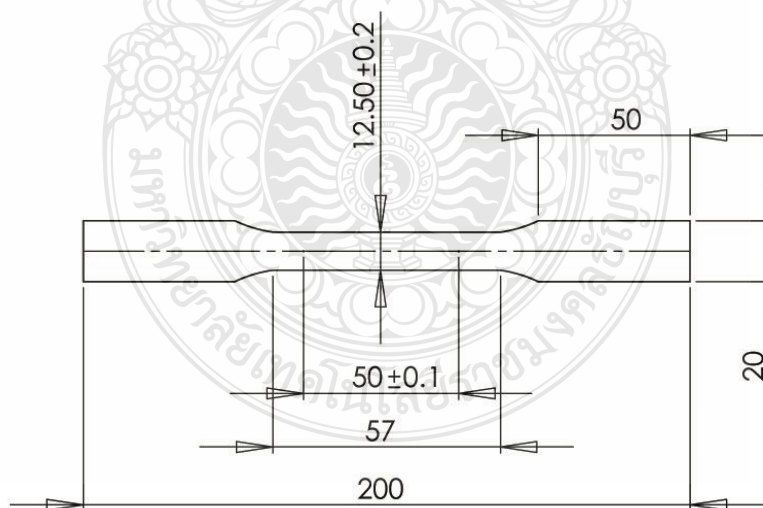
รูปที่ 3.7 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร

8. ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร แรงดันสูงสุด 700 บาร์ สายน้ำมันไฮดรอลิกชนิดรับแรงคัดสูงพร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วง

9. อุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ
10. ไมโครคาลิปเปอร์ ชนิดปลายเข็มสำหรับวัดความหนาชั้นทดสอบหลังการขึ้นรูป
11. อุปกรณ์ที่ใช้สร้างกริด ได้แก่
 - 1) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Lectroetch Power Unit)
 - 2) ลูกกลิ้งรีด (Lectroetch Roller Marker)
 - 3) น้ำยาลีเก็กโทรไลต์ สูตร LNC-2 Electrolyte
 - 4) น้ำยาล้างทำความสะอาดชิ้นงานสูตร 1
 - 5) ผ้าสักหลาดซับน้ำยาลีเก็กโทรไลต์
 - 6) แผ่นกริดวงกลม (Stencils)

3.2.2 ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดการ (Anisotropy) และสมบัติของโลหะผสม

ตารางที่ 3.1-3.3 สมบัติของโลหะผสมทั้ง 3 ชนิด ตามมาตรฐาน JIS โดยส่วนประกอบทางเคมีของทองแดง C1100 ทองเหลือง C2801 ตามมาตรฐาน JIS G 3141:2005 สำหรับสมบัติแอนไอโซทรอปี ทำการทดสอบโดยการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 ทำการทดสอบแรงดึงตามทิศทางการรีดของโลหะแผ่น 3 ทิศทาง คือ 0 45 และ 90 องศา รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงโลหะผสม ตามมาตรฐาน ASTM E8



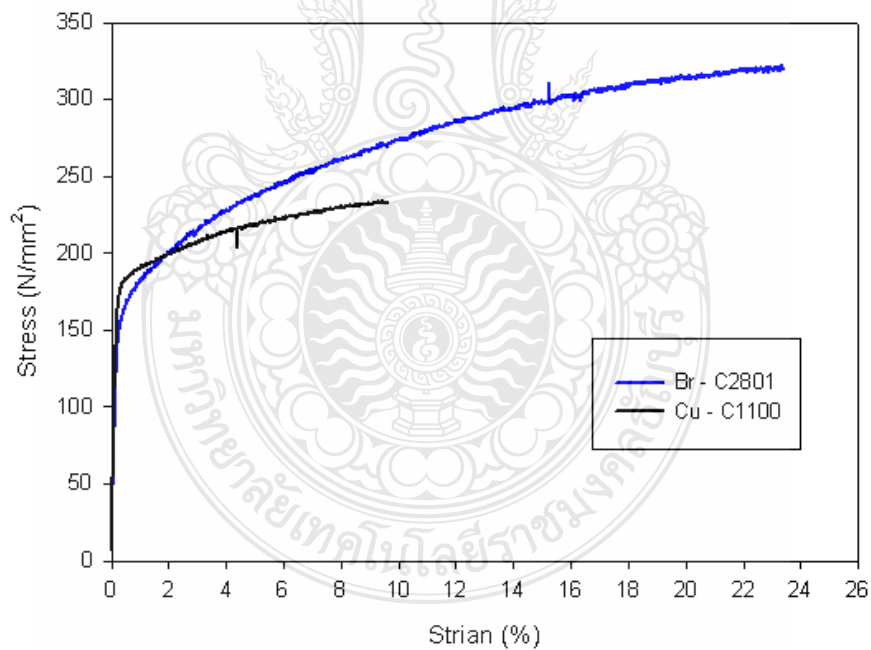
รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงของโลหะผสม ตามมาตรฐาน ASTM E8

ตารางที่ 3.1 สมบัติของทองแดงเกรด C1100

สัญลักษณ์	การใช้งาน	ส่วนประกอบทางเคมี (%)				สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง (K) N/mm ²	n	ความเค้นดึง (N/mm ²)		
		Cu						R ₀	R ₄₅	R ₉₀
Copper C1100	ทั่วไป	99.90				186.3	0.19	0.873	0.889	0.876

ตารางที่ 3.2 สมบัติของทองเหลืองเกรด C2801

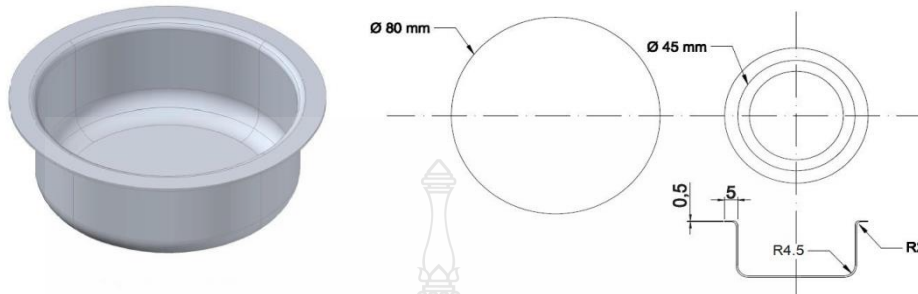
สัญลักษณ์	การใช้งาน	ส่วนประกอบทางเคมี (%)				สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง (K) N/mm ²	n	ความเค้นดึง (N/mm ²)		
		Cu	Pb	Fe	Zn			R ₀	R ₄₅	R ₉₀
Brass C2801	ทั่วไป	59.00	0.01	0.07	39.70	171.5	0.2	1.147	1.242	1.125



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 ชนิด

3.2.3 ทำการออกแบบแม่พิมพ์การลากลึกรูปลึกลึกซึ่งสามารถอัดแรงดันน้ำมันเข้าไปยังแม่พิมพ์ได้

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



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก [29]

1. ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นคำนวณตามทฤษฎี ในบทที่ 2

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

$$= 75.7 \text{ มิลลิเมตร}$$

กำหนดให้แผ่นทดสอบเท่ากับ 80 มิลลิเมตร (เพื่อมุม โค้งคายและพื้นซ์)

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

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

$$= 0.66 \text{ มิลลิเมตร}$$

กำหนดให้ระยะช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.65 มิลลิเมตร

4. มุมพินช์ ขึ้นอยู่กับชิ้นงานตามความต้องการ

กำหนดให้มุมพินช์ $r_p = 4.5$ องศา

3.2.4 คำนวณขนาดของแรงกดแผ่นทดสอบ

1. แรงดันกดแผ่น โลหะ (Blank Holder Pressure ,P)

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

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

$$c \text{ สำหรับโลหะผสม} = 0.002$$

$$\text{แรงดันกดแผ่น โลหะ} = 1.04 \text{ n / mm}^2$$

2. พื้นที่ของการกดแผ่น โลหะ (Blank Holder Area , A_{BH})

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

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

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

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

3. แรงกดยึดแผ่น โลหะ (Blank Holder Force, F_{BH})

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

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

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

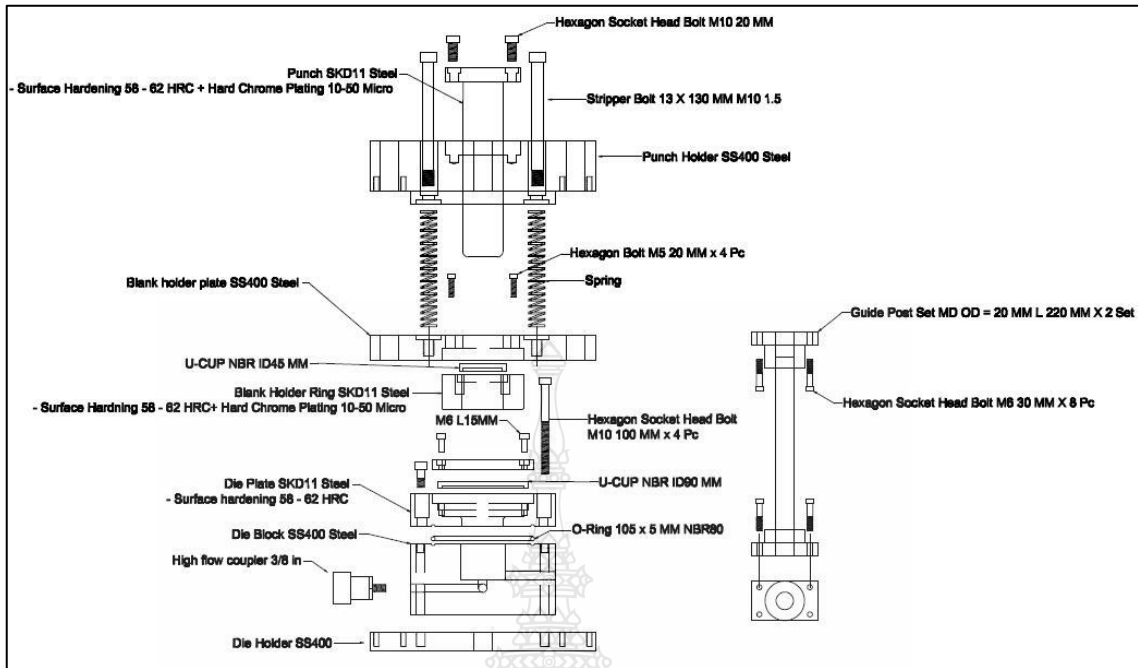
- สปริงค่าคงที่ 9.42 นิวตันต่อมิลลิเมตร แรงกดรวม 75.36 นิวตันต่อมิลลิเมตร
- สปริงค่าคงที่ 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร แรงกดรวม 156.96 นิวตันต่อมิลลิเมตร
- สปริงค่าคงที่ 35.69 นิวตันต่อมิลลิเมตร แรงกดรวม 285.2 นิวตันต่อมิลลิเมตร

ออกแบบระยะกดแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปที่ระยะ 25 มิลลิเมตร

3.2.5 การออกแบบแม่พิมพ์

สำหรับแม่พิมพ์ชุดล่าง (Die) จะมีห้องบรรจุของเหลว (Liquid Chamber) เจาะรูจากด้านบนของคาย สำหรับต่อท่อทางเดินของน้ำมันไฮดรอลิก จากชุดต้นกำลังไฮดรอลิก สำหรับชุดแม่พิมพ์ทำการป้องกันการรั่วไหลของของเหลว 3 จุด คือ 1. บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นหน้าคาย ซึ่งใช้เหล็กชุบ SKD11 ชุบแข็งกับตัวคายซึ่งใช้เหล็ก SS400 โดยใช้ซีลโอริง NBR 2. บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างแผ่นกดชิ้นงานซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hare Chrome กับผิวคาย โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 90 มิลลิเมตร สูง 8 มิลลิเมตร และ 3. บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างพื้นซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hare Chrome กับผิวด้านในของแผ่นกดชิ้นงาน โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 45 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร รูปที่

3.11 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์



รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์ [5]

3.2.6 การออกแบบชุดต้นกำเนิด และระบบควบคุมไฮดรอลิกสำหรับอันแรงดันเข้าแม่พิมพ์

ชุดต้นกำเนิดและระบบควบคุมไฮดรอลิก ได้รับการออกแบบและสร้างโดยบริษัท ฟร็อน-เทค เอ็นจิเนียริง จำกัด ขนาดของมอเตอร์ปั๊ม 3 แรงม้า ระบบไฟฟ้า 3 เฟด ปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกแบบลูกสูบ กำลังใช้งานสูงสุด 700 บาร์ อัตราการไหล 0.5 – 1 ลิตร / นาที รูปที่ 3.11 วงจรการทำงาน of ระบบไฮดรอลิก โดยมีวงจรการทำงานและการควบคุมดังต่อไปนี้

1. ในขณะที่เครื่องทำงานที่สวิทช์ควบคุมปกติปิด ของเหลวจะไหลจากถังเก็บด้วยแรงดันของปั๊ม ผ่านสวิทช์ควบคุมกลับถังเก็บโดยไม่ผ่านลิ้นควบคุมความดัน [30] ในรูปที่ 3.4 สวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก
2. เมื่อเปิดสวิทช์ควบคุมของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ผ่านลิ้นควบคุมความดันทั้งสองตัว
3. ทำการปรับค่าความดันเข้าสู่ระบบแม่พิมพ์ หมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ (ตามรูปที่ 3.5 ลิ้นควบคุมความดันตัวล่าง)
4. ทำการปรับค่าความดันควบคุมภายในห้องแม่พิมพ์ โดยหมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์ (ตามรูปที่ 3.5 ลิ้นควบคุมความดันตัวบน)
5. เมื่อของเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันที่สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ ของเหลวจะไหลกลับสู่ถังเก็บ โดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ ในขณะเดียวกันเมื่อความดันภายในห้อง

แม่พิมพ์สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ของเหลวจะไหลกลับถึงเก็บ โดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์ [30]

6. บริเวณทางของเหลวไหลเข้าของแม่พิมพ์ใช้อุปกรณ์ป้องกันการไหลย้อนกลับของเหลว (Ball Valve)

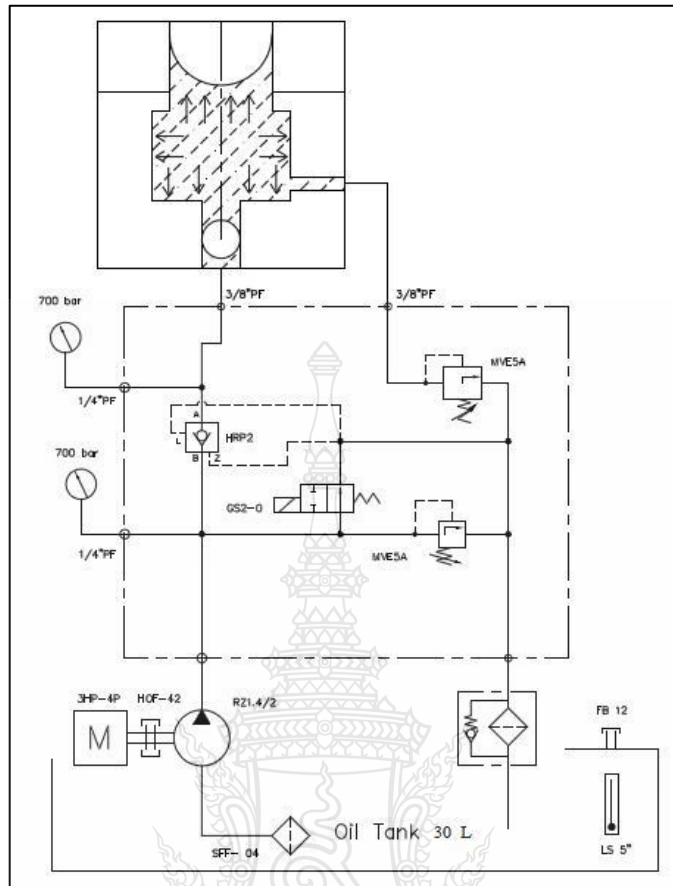
7. อุปกรณ์วัดแรงดันของเหลว 2 จุด

8. ทำการศึกษาทดลองที่ความดันควบคุม 25 บาร์ , 50 บาร์ และ 75 บาร์

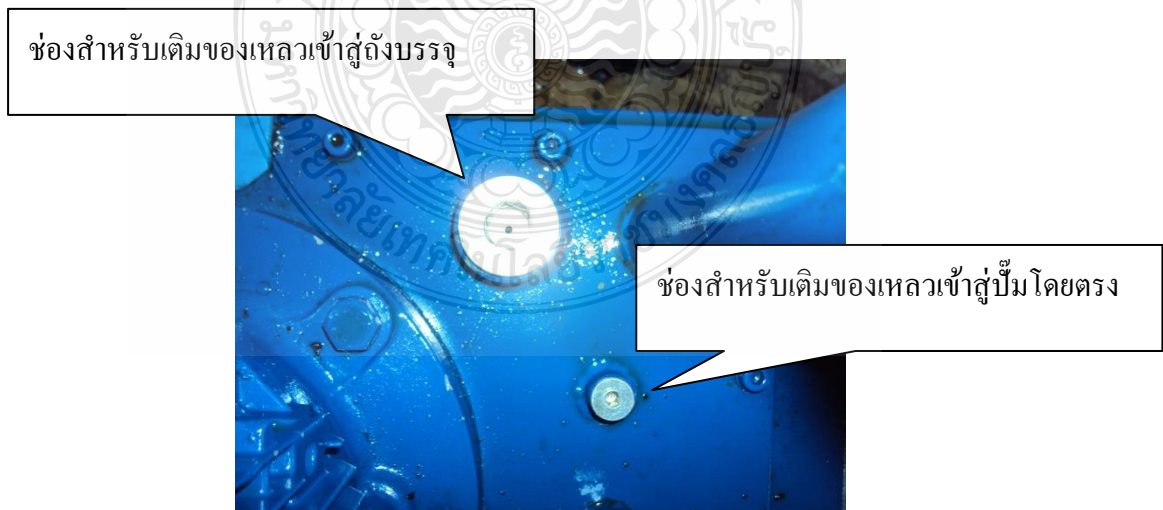
9. ทำการเปลี่ยนถ่ายของเหลวเพื่อทำการทดลองโดยใช้น้ำมันแร่ (Hydraulic Oil) ISO VG 68 ; โดยการคลายสกรูด้านล่างของถังเพื่อปล่อยน้ำมันออก เปิดฝาด้านหน้าเพื่อทำความสะอาดภายในถัง หลังจากนั้นประกอบฝาดังและสกรูถ่ายของเหลว จากนั้นเติมของเหลวที่ถัง โดยเติมผ่านช่องเติมด้านบนจนถึงจนกระทั่งภายในถังเต็ม หลังจากนั้นเติมของเหลวเข้าไปยังปั๊มโดยตรงผ่านทางช่องรูเล็ก เพื่อป้องกันอากาศที่ช่องทางเข้าของปั๊ม (Cavitations) ในรูปที่ 3.11 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง



รูปที่ 3.12 แผงสวิตช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก



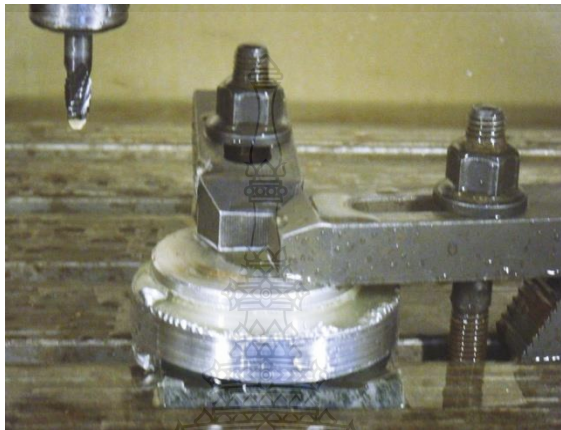
รูปที่ 3.13 วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก [5]



รูปที่ 3.14 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊ม โดยตรง

3.2.7 การเตรียมแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง

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



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนของการกัดแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง



(ก) ทองแดง

(ข) ทองเหลือง

รูปที่ 3.16 แผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง เมื่อกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

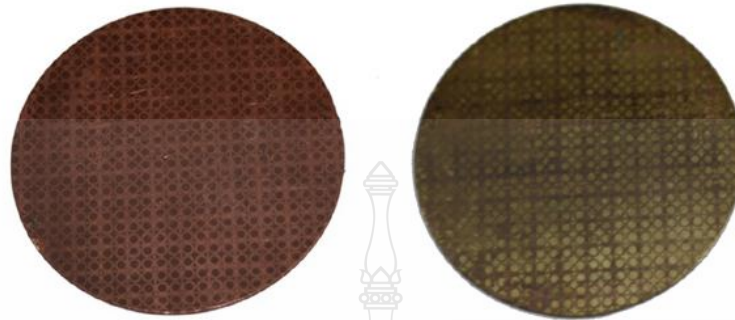
3.2.8 การสร้างกริดบนแผ่นทดลอง

การสร้างกริดที่แผ่นชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับการวัดค่าความเครียดหลัก และความเครียดดลอง โดยใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า กระบวนการตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้าเป็นการชุบเคลือบผิววัสดุทำให้เกิดลายตาราง เพื่อทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังจากที่ชิ้นงานได้ผ่านการ

ชิ้นรูป [8] โดยสร้างกริดวงกลมขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่ใช้กริดเกลือกัดด้วยไฟฟ้ามีกระบวนการดังต่อไปนี้คือ

1. จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการสร้างกริด ดังต่อไปนี้
 - แผ่นเหล็กขนาดพอเหมาะกับโต๊ะปฏิบัติงาน
 - แผ่นลอกลายกริดวงกลม (stencil) ขนาด 10 x 12 นิ้ว
 - น้ำยาล้างทำความสะอาดแผ่น โลหะ
 - น้ำยาอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้ในการกัดแผ่น โลหะซึ่งใช้สำหรับเหล็ก
 - ตัวปรับไฟ (Rectifier) พร้อมด้วยสายต่อ 2 สายที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน
 - น้ำยากัดสนิม
2. ใช้แผ่นเหล็กวางบนโต๊ะปฏิบัติงาน สำหรับรองชิ้นงานในการทดลอง เพื่อต่อวงจรไฟฟ้า
3. ประกอบตัวปรับแรงดันและแปลงไฟ โดยใช้สายดินหนีบกับแผ่นเหล็กรองและ อีกสายหนึ่งติดลูกกลิ้ง
4. นำแผ่นโลหะผสมทดสอบ ทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้เป็นชิ้นงานในการทดลอง วางบนแผ่นเหล็กรอง โดยที่แผ่นชิ้นงานจะต้องผ่านการแต่งครีบและขอบ พร้อมกับล้างคราบไขมันให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้ง และระวังอย่าให้มีเศษโลหะหรือวัสดุใดๆ เพราะจะทำให้ แผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) เกิดทะลุได้ในขณะใช้ลูกกลิ้งกดขณะขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า
5. นำแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) วางบนชิ้นงานโดยจัดให้เหมาะสมกับชิ้นงาน
6. นำแผ่นเบาะรองที่จุ่มด้วยน้ำยา อิเล็กโทรไลต์ หมาดๆ เช็ดบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ในบริเวณที่จะตีกริดให้ทั่วถึงโดยให้หมาดๆ แล้วจัดแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ให้ตั้งอย่างให้ชัน
7. นำแผ่นเบาะรองจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์และบิดพอให้เปียก วางบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) อีกทีหนึ่งในกรณีแผ่นเบาะรองยังจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ก็ยังไม่ต้องจุ่มน้ำยาจนกว่าจะแห้งพอสมควร
8. เปิดสวิตซ์ที่เครื่องปรับไฟ ปรับตั้งขนาดไฟฟ้าให้เหมาะสม ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนแผ่นเบาะรองด้วยน้ำหนักพอสมควร และเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆเพียงครั้งเดียว ซึ่งสังเกตโดยให้เข็มวัดกระแสไฟฟ้ากระดิกมาที่กึ่งกลางหรือสูงๆของมาตรวัด จะทำให้ กริดวงกลมบนแผ่น โลหะมีความชัดเจนและเส้นมีความคมสวยงาม หลังจากนั้นจึงปิดสวิตซ์ไฟแล้วนำแผ่นเบาะรองและแผ่นลอกลายกริด ออกเพื่อดูว่า กริดวงกลมมีความชัดเจนหรือไม่

9. หลังจากตีกริดวงกลมเสร็จแล้ว ให้นำแผ่นทดสอบมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาด และเช็ดให้แห้งแล้วพ่นน้ำยากัดสนิม เพื่อรอการศึกษาทดลองต่อไป



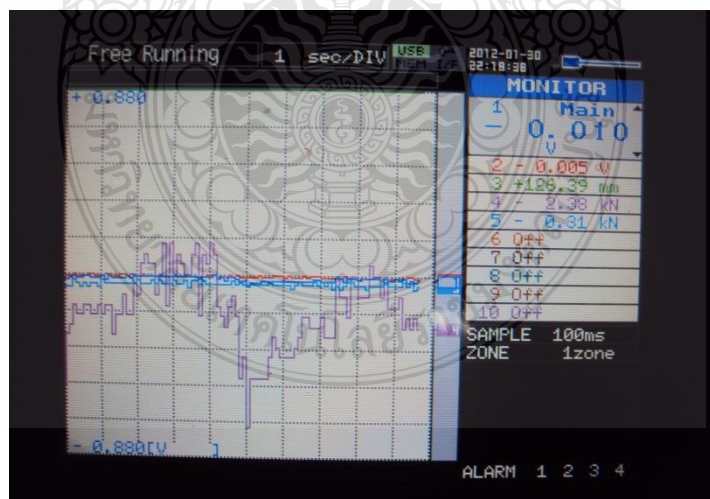
(ก) แผ่นทองแดง C1100

(ข) แผ่นทองเหลือง C2801

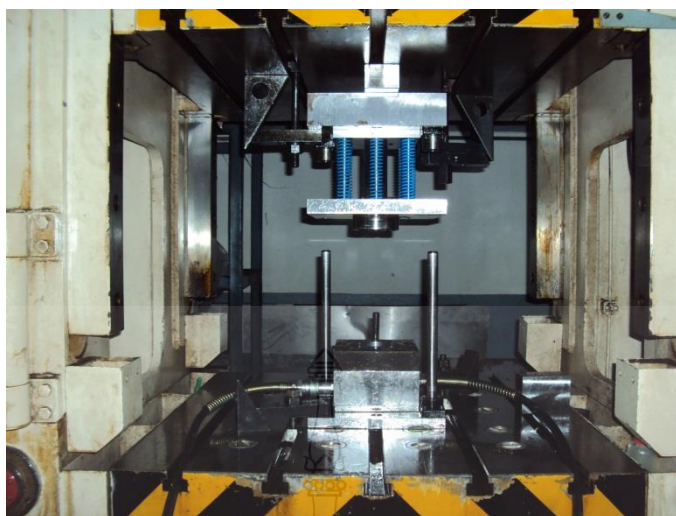
รูปที่ 3.17 แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว

3.2.9 ติดตั้งแม่พิมพ์พร้อมอุปกรณ์วัดแรงกดในแนวแกน

ติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องบีบอัด 80 ตัน และอุปกรณ์วัดแรง รูปที่ 3.18 อุปกรณ์วัดแรงกด สำหรับต่อพวงเข้ากับเครื่องบีบอัด และรูปที่ 3.19 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องบีบอัดเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.18 อุปกรณ์วัดแรงกดสำหรับต่อพวงเข้ากับเครื่องบีบอัด



รูปที่ 3.19 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องบีบอัดเรียบร้อยแล้ว

3.2.10 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ใช้การลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอก ซึ่งเป็นรูปทรงที่งานต่อการออกแบบแม่พิมพ์ การขึ้นรูป และการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษาทดลอง สำหรับตัวแบบในการศึกษาทดลองได้แก่ การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว (Fluids Pressure) เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบธรรมดาโดยไม่ใช้แรงดันของเหลว, ใช้ของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เกรด VG 68 และขนาดแรงกดแผ่นทดสอบ (Blank Holder Force) โดยใช้สปริงที่มีค่าคงที่สปริงแตกต่างกันเป็นตัวกดแผ่นทดสอบ ลำดับขั้นของการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดเป็นไปตามตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดา

แรงกดแผ่นขึ้นงาน (kN)	การขึ้นรูปแบบธรรมดา
1.884	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ
3.924	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ
7.130	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดาด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้
น้ำมันไฮดรอลิกเกรด 68

แรงกดแผ่นขึ้นงาน (kN)	แรงดันของเหลว โดยใช้น้ำมันไฮดรอลิก (68) ค่าความ หนืด 68.98 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที (MPa)		
1.884	2.5	5.0	7.5
3.924	2.5	5.0	7.5
7.130	2.5	5.0	7.5

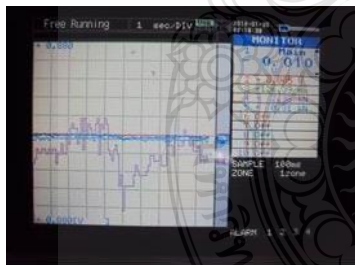
3.2.11 อุปกรณ์บันทึกผลการทดลอง



(ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน



(ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ



(ค) ลักษณะของสัญญาณการวัดแรงกดพื้นที่



(ง) ไมโครคาลิปเปอร์ชนิดปลายเข็ม

รูปที่ 3.20 อุปกรณ์วัดแรงดันและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป

3.3 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง

3.3.1 การวัดแรงในการลากขึ้นรูป

ในการวัดแรงในการลากขึ้นรูป ที่สภาวะการทดลองต่างๆเปรียบเทียบกัน เพื่อวิเคราะห์ถึงแรงที่กระทำกับแผ่นขึ้นงานในการทดลอง ที่มีต่อขึ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป และประสิทธิภาพ

ของการขึ้นรูปในสถานะต่างๆ สำหรับการวัดค่าแรงกดในแนวแกนตั้ง ใช้เครื่องมือวัดชนิดวัดแรงกดอัดที่ต่อพ่วงเข้ากับเครื่องบีบอัด ในการวัดค่าจะได้แรงกดพื้นที่ทั้งหมดที่กดลงบนชิ้นงาน แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อแผ่นชิ้นงานคำนวณได้ตามทฤษฎีในบทที่ 2

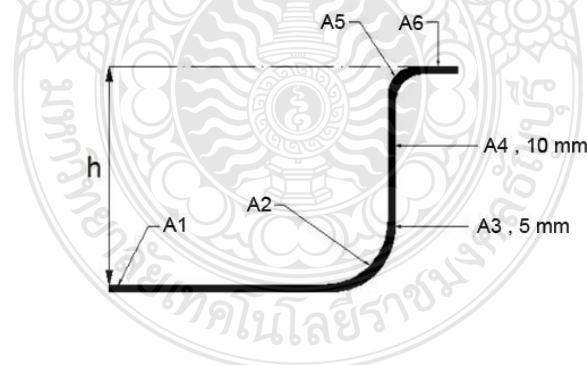
$$F_d = F_p - \left(\frac{\pi}{4} \times d_p^2 \times P \right)$$

3.3.2 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป

ทำการทดลองโดยการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เพื่อพิจารณาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ได้แก่ รอยแตกที่ผนังของชิ้นงาน และ รอยย่นที่ปากถ้วย ด้วยการใช้การตรวจสอบด้วยสายตา

3.3.3 ความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

หลังจากการทดลองการขึ้นรูปที่สถานะตามที่กำหนดแล้ว ทำการผ่าชิ้นงานด้วยเครื่องตัด Wire Cut แล้วทำการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน ในจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานตามทฤษฎีในบทที่ 2 โดยใช้ไมโครคาร์ิปเปอร์วัดความหนาของแผ่นชิ้นงานในการทดสอบ และ ชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ตามรูปที่ 3.20 (ง) ไมโครคาร์ิปเปอร์สำหรับวัดความหนาของแผ่นทดสอบก่อนการขึ้นรูป และรูปที่ 3.21 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 3.21 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [5]

3.3.4 วัดความเครียดที่เกิดขึ้นกับผนังชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

การวัดค่าเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานตามแนวแกน X และแนวแกน Y จะกระทำโดยการวิเคราะห์กริดวงกลมจากการกัดด้วยกรดเกลือ ซึ่งมีขนาดของกริดวงกลมเท่ากับผ่านศูนย์กลาง

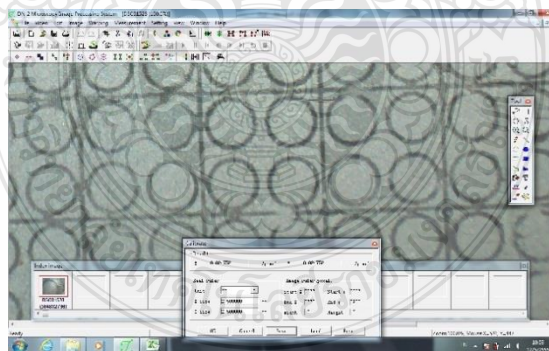
2.5 มิลลิเมตร โดยหลังการขึ้นรูปปริศนาดวงกลมบนแผ่นทดสอบจะเปลี่ยนรูปเป็นวงรี วัดขนาดของวงรีเพื่อกำหนดขนาดโตสุดคือความเครียดหลัก (Major Strain) และขนาดต่ำสุดคือความเครียดรอง (Minor Strain) ความเครียดทั้งสองนี้จะถูกพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยขึ้นตอนวัดขนาดกริดจากการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) ซึ่งมีวิธีการวัดดังนี้

1. ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ปรับโฟกัสตามลักษณะขึ้นทดสอบ ทำการถ่ายภาพขนาดกริดมาตรฐานก่อนทำการขึ้นรูป ที่ระยะโฟกัสเดียวกัน เพื่อทำการกำหนดให้เป็นขนาดอ้างอิงในโปรแกรม สำหรับใช้ในการวัดขนาด วงกลมกริดที่เปลี่ยนไป

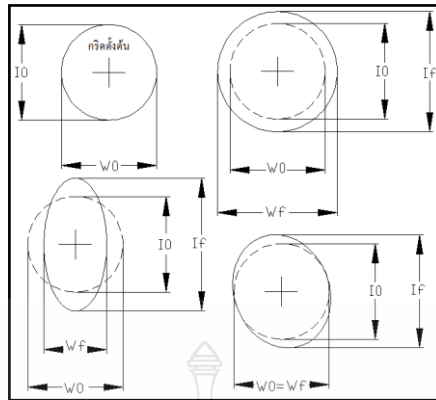
2. ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสตามลักษณะขึ้นทดสอบ โดยให้ขณะที่ถ่ายภาพ พื้นผิวของแผ่นทดสอบที่จะทำการถ่ายภาพจะต้องได้รับการปรับให้ขนานกับหน้ากล้อง Microscope โดยให้ระยะโฟกัสที่ทำการถ่ายภาพกริด นั้นจะต้องเท่ากันในทุกชิ้นงานทดลอง

3. เลือกกริดวงกลมที่เกิดการเปลี่ยนขนาดของวงกลมกริด เป็นวงรีในแต่ละชิ้นการทดสอบแล้ว นำมาสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวนอน

4. ทำการวัดขนาดกริดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Dcal Image Processing วัดขนาดของกริดในแนวตั้งและแนวนอน แล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก



รูปที่ 3.22 การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing



รูปที่ 3.23 การวัดอัตราความเครียดหลักและอัตราความเครียดรอง [6]

5. อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

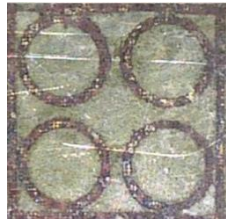
$$\text{ความเครียดหลัก (Major strain)} = \frac{\text{ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนหลักเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}}$$

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

โดย

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

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



(ก)



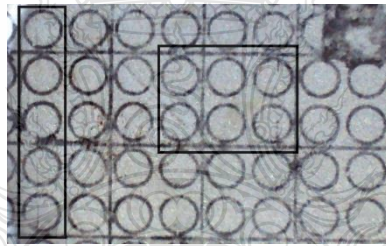
(ข)

(ก) ลักษณะกริดวงกลมก่อนการขึ้นรูป (ข) ลักษณะของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการขึ้นรูป

รูปที่ 3.24 ลักษณะของกริดวงกลมก่อนและที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป

7. ตำแหน่งของการวัดกริด

1) ตำแหน่งของการวัดกริด ที่ตำแหน่งของก้นถ้วย



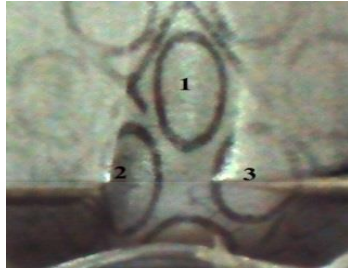
รูปที่ 3.25 กริดวงกลมที่ทำการวัดหลังการขึ้นรูปในตำแหน่งก้นถ้วยบริเวณกึ่งกลางและขอบถ้วย

2) ตำแหน่งของการวัดกริด ที่ตำแหน่งผนังด้านข้าง



รูปที่ 3.26 กริดวงกลมที่ทำการวัดในตำแหน่งผนังถ้วยด้านข้างและมุมคาย

3) ตำแหน่งของการวัดกริด ลักษณะการร้าวที่ผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.27 กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการร้าวบนผิวชิ้นงาน

3.3.5 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

1. เปรียบเทียบแรงกดพื้นที่โดยรวม ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติกับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5.0 และ 7.5 MPa ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป

2. เปรียบเทียบแรงกดชิ้นงาน 1.884 kN, 3.924 kN และ 7.130 kN ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติกับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5.0 และ 7.5 MPa ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป

3. เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติกับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5.0 และ 7.5 MPa และแรงกดชิ้นงาน 1.884, 3.924 และ 7.130 kN ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป โดยพิจารณาจากปัญหารอยแตกกับ รอยย่นที่ปากถ้วยของชิ้นงาน

4. เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน และเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นกับผิวชิ้นงาน โดยการวัดขนาดของกริดแล้วพลอตลงบน แผ่นภาพชนิดจำกัดในการขึ้นรูป เปรียบเทียบผลดังต่อไปนี้

5. เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูประหว่างการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติกับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5.0 และ 7.5 MPa ด้วยแรงกดชิ้นงาน 1.884, 3.924 และ 7.130 kN

6. เปรียบเทียบความเครียดที่ผิวชิ้นงานระหว่างการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติกับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa ด้วยแรงกดชิ้นงานที่ 1.884, 3.924 และ 7.130 kN

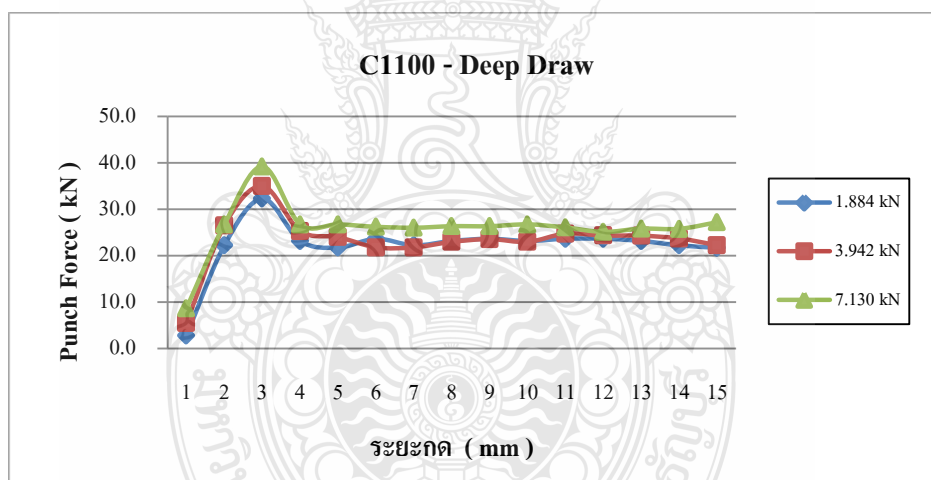
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาและทดลองในงานวิจัยเรื่อง อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึกโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 2 ชนิด คือ ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำหรับผลการทดลองนั้นผู้วิจัยขอเสนอผลการวิจัยเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

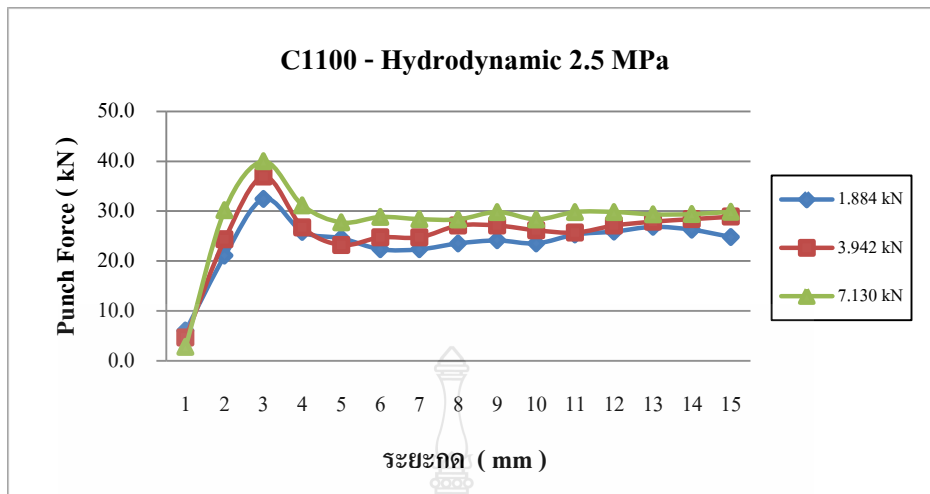
4.1 อิทธิพลของแรงกดแผ่นชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

4.1.1 แรงในการลากขึ้นรูปลึกแผ่นทองแดง C1100



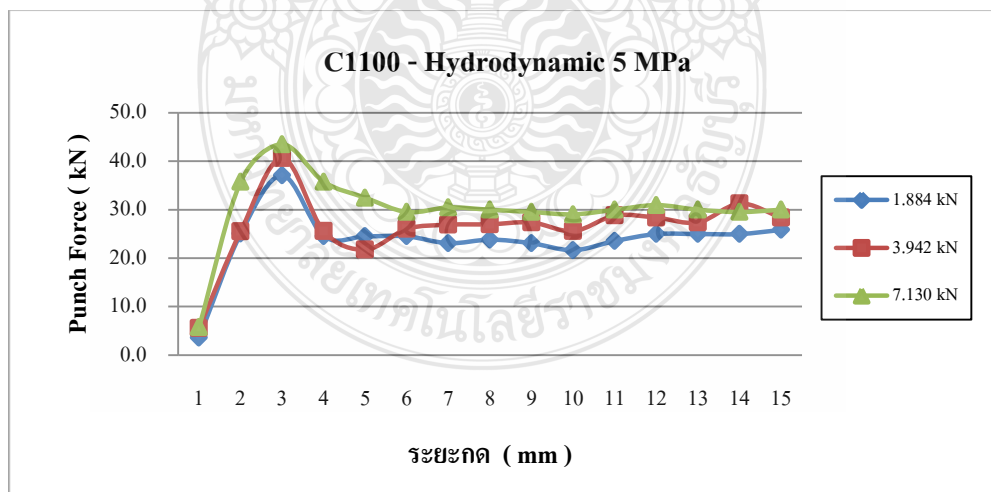
รูปที่ 4.1 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติ

รูปที่ 4.1 พบว่าการลากขึ้นรูปลึกแผ่นทองแดง C1100 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติเมื่อมีแรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 32.28 kN เมื่อแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 34.99 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 39.91 kN



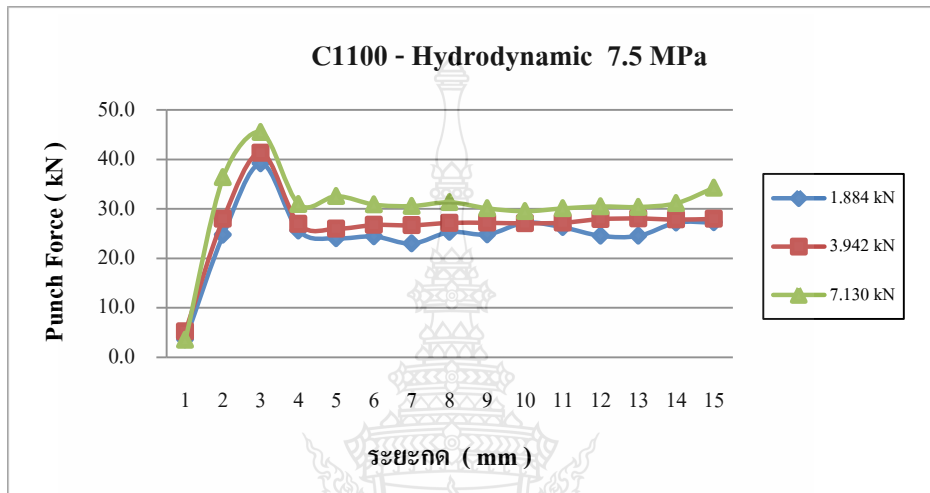
รูปที่ 4.2 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa

รูปที่ 4.2 พบว่าการลากขึ้นรูปลึงค์แผ่นทองแดง C1100 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึงค์แบบไฮดรอดนามิกส์ เมื่อมีแรงกดแผ่นขึ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 32.44 kN เมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นขึ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 36.91 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นขึ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 39.28 kN



รูปที่ 4.3 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa

รูปที่ 4.3 พบว่าการลากขึ้นรูปลึงแผ่นทองแดง C1100 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึงแบบไฮโดรไดนามิกส์ เมื่อมีแรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 37.06 kN เมื่อแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 40.64 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 43.49 kN

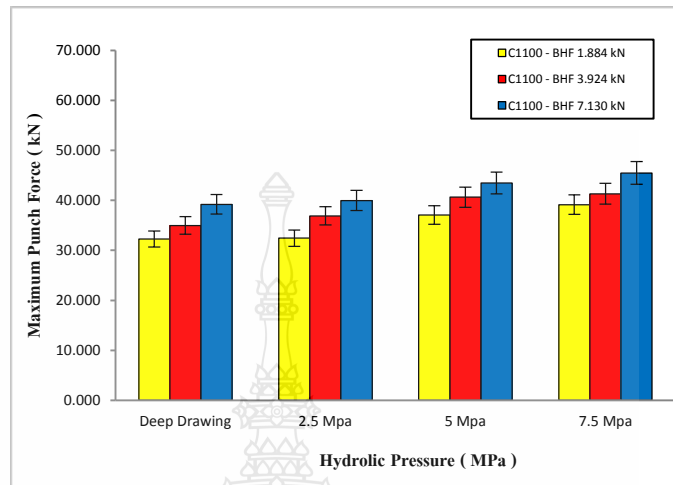


รูปที่ 4.4 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.4 พบว่าการลากขึ้นรูปลึงแผ่นทองแดง C1100 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึงแบบไฮโดรไดนามิกส์เมื่อมีแรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 39.14 kN เมื่อแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 41.32 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 45.49 kN

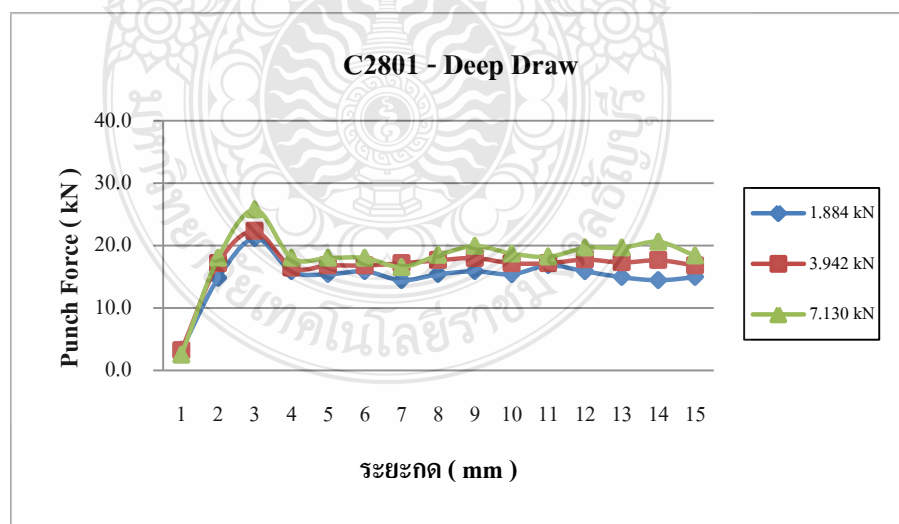
เมื่อเปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูปของ ทองแดง C1100 ตามรูปที่ 4.5 พบว่าการลากขึ้นรูปลึงแบบปกติใช้แรงในการลากขึ้นรูปลึงสูงสุดของแผ่นทองแดง C1100 น้อยกว่าการลากขึ้นรูปลึงแบบไฮโดรไดนามิกส์ และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นชิ้นงาน จาก 1.884 kN เป็น 3.942 kN และ 7.130 kN จะต้องเพิ่มแรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ย 9.351 เปอร์เซ็นต์ และ 19.571 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแรงลากขึ้นรูปของทองแดงนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันเข้าไปในระบบอีกด้วย แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นตามแรงดันน้ำมันที่เพิ่มเข้าไปในระบบคือที่แรงดันน้ำมัน 2.5 และ 5 MPa จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเพิ่มขึ้นจากการลากขึ้นรูปลึงแบบปกติ 2.65 เปอร์เซ็นต์ และ 13.96 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ และแรงดันน้ำมัน 7.5 MPa จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเพิ่มขึ้นจากการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติถึง 18.45 เปอร์เซ็นต์



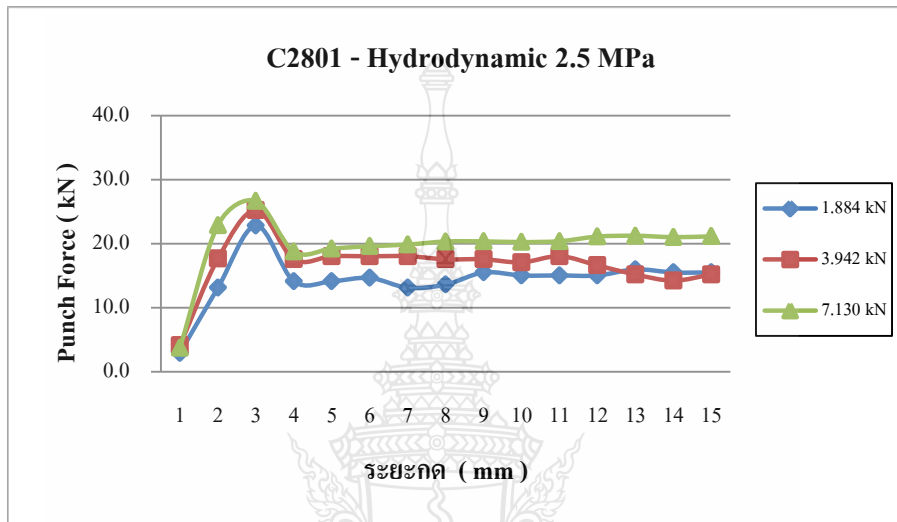
รูปที่ 4.5 แรงลากขึ้นรูปสูงสุดแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa

4.1.2 แรงในการลากขึ้นรูปลึกแผ่นทองเหลือง C2801



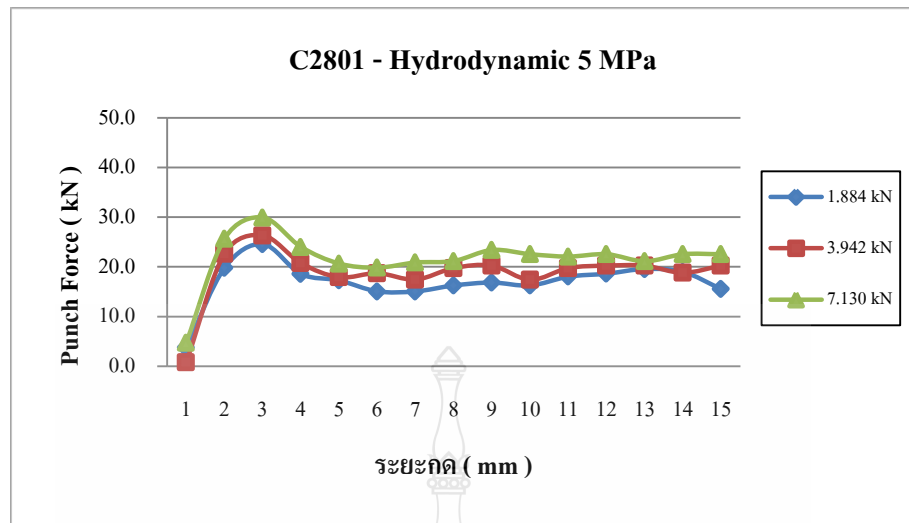
รูปที่ 4.6 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติ

รูปที่ 4.6 พบว่าการลากขึ้นรูปปลีกแผ่นทองเหลือง C2801 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปปลีกแบบปกติ เมื่อมีแรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 21.16 kN เมื่อแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 23.32 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 25.76 kN



รูปที่ 4.7 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa

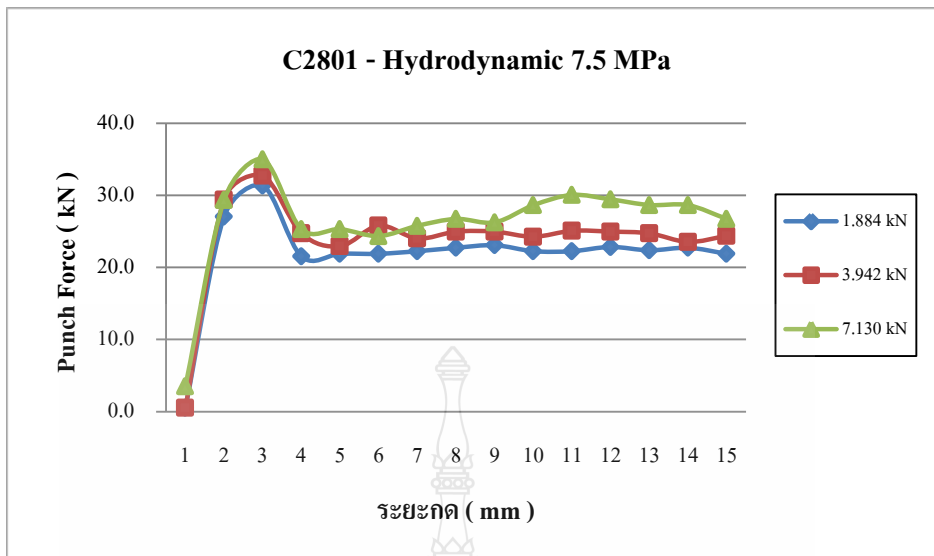
รูปที่ 4.7 พบว่าการลากขึ้นรูปปลีกแผ่นทองเหลือง C2801 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปปลีกแบบไฮดรอดนามิกส์ เมื่อมีแรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 22.81 kN เมื่อแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 25.21 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นชิ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 26.65 kN



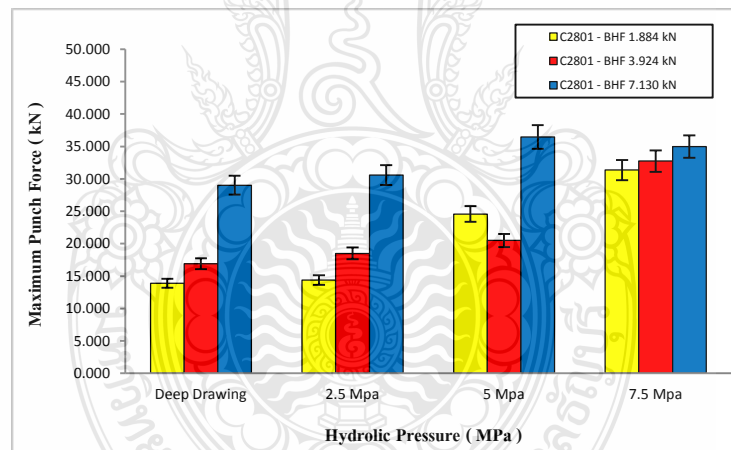
รูปที่ 4.8 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa

รูปที่ 4.8 พบว่าการลากขึ้นรูปลึงค์แผ่นทองเหลือง C2801 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึงค์แบบไฮโดรไดนามิกส์ เมื่อมีแรงกดแผ่นขึ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 24.58 kN เมื่อแรงกดแผ่นขึ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 26.35 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นขึ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 29.96 kN

ส่วนการลากขึ้นรูปลึงค์แผ่นทองเหลือง C2801 ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึงค์แบบไฮโดรไดนามิกส์ เมื่อมีแรงกดแผ่นขึ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 31.36 kN เมื่อแรงกดแผ่นขึ้นงานเป็น 3.942 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 32.73 kN และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นขึ้นงานเป็น 7.130 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด 24.98 kN ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa



รูปที่ 4.10 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C2801 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa

การลากขึ้นรูปปลีแบบปกติใช้แรงในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 น้อยกว่าการลากขึ้นรูปปลีแบบไฮดรอดนามิกส์ และเมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นขึ้นงาน จาก 1.884 kN เป็น 3.942 kN และ 7.130 kN จะต้องเพิ่มแรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ย 9.55 เปอร์เซ็นต์ และ 70.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแรงลากขึ้นรูปของทองเหลืองนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันเข้าไปในระบบเช่นเดียวกับ

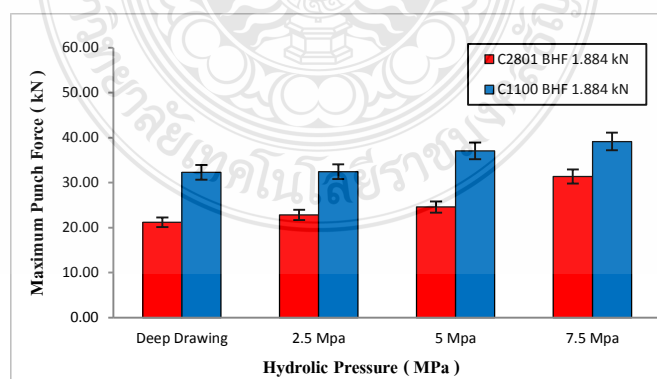
ทองแดง C1100 อีกด้วย แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นตามแรงดันน้ำมันที่เพิ่มเข้าไปในระบบ คือที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa และ 5 MPa จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเพิ่มขึ้นจากการลากขึ้นรูป ลึกแบบปกติ 6.19 เปอร์เซ็นต์ และ 41.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa จะใช้ แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเพิ่มขึ้นจากการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติมากถึง 80.04 เปอร์เซ็นต์

4.1.3 เปรียบเทียบแรงลากขึ้นรูปของโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 2 ชนิด

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติและลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอ ไดนามิกส์โดยใช้แรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884 kN

Material	Blank Holder Force	Deep Drawing	2.5 MPa	5 Mpa	7.5 MPa
C2801	BHF 1.884 kN	21.160	22.810	24.580	31.360
C1100	BHF 1.884 kN	32.280	32.440	37.060	39.140

จากรูปที่ 4.11 แผ่นทองแดง C1100 นั้นในการลากขึ้นรูปแบบปกติแม้จะมีแรงลากขึ้นรูปที่ น้อยกว่าแรงลากขึ้นรูปในกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์แต่ก็ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากชิ้นงานเกิด การฉีกขาด ส่วนวัสดุแผ่นทองเหลือง C2801 แรงลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ย 14.391 kN, 16.936 kN และ 29.597 kN ตามลำดับ แรงในการลากขึ้นรูปของทองเหลืองในกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์แม้แรง ในการลากขึ้นรูปจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมัน และแรงกดเหยียบสปริงแต่ทองเหลืองยัง สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสถานะ

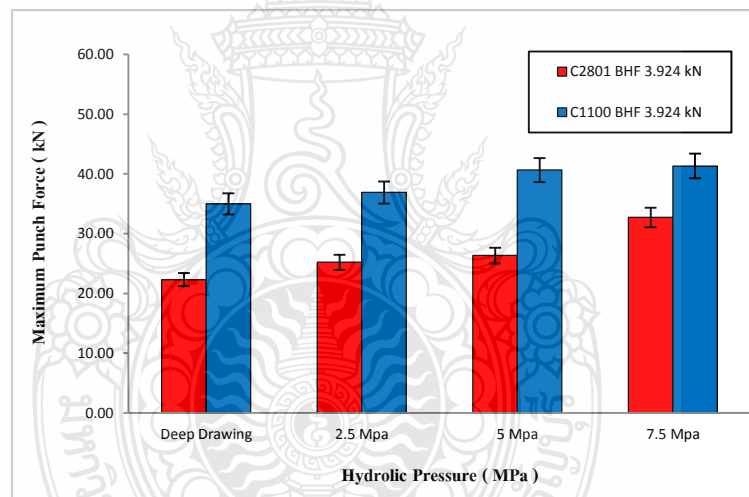


รูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 2 ชนิด ในการขึ้นรูปแบบปกติ เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงกด 1.884 kN

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติและลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์โดยใช้แรงกดแผ่นขึ้นงาน 3.942 kN

Material	Blank Holder Force	Deep Drawing	2.5 MPa	5 MPa	7.5 MPa
C2801	BHF 3.924 kN	22.313	25.210	26.350	32.733
C1100	BHF 3.924 kN	34.990	36.910	40.640	41.320

จากรูปที่ 4.12 แผ่นทองแดง C1100 ยังคงใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงที่สุด และในการทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa. ส่งผลให้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยที่แผ่นทองแดง C1100 ใช้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ย 34.459, 37.614 และ 38.219 kN ตามลำดับ และแผ่นทองเหลือง C2801 ใช้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ย 17.501, 20.486 และ 28.481 kN ตามลำดับ

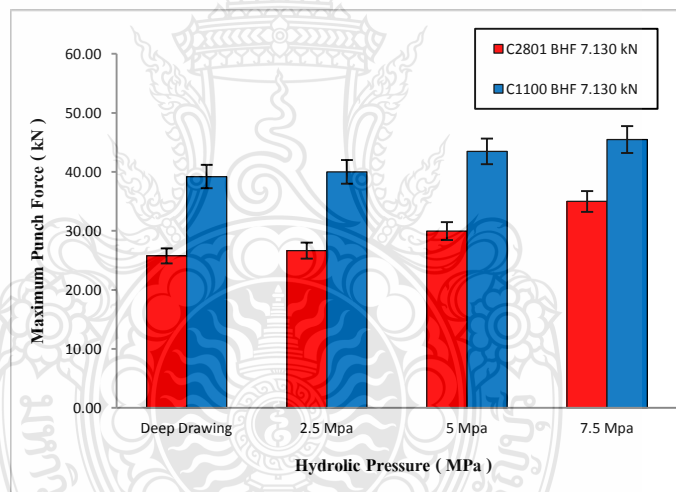


รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่น ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติ เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติและลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์โดยใช้แรงกดแผ่นชิ้นงาน 7.130 kN

Material	Blank Holder Force	Deep Drawing	2.5 MPa	5 MPa	7.5 MPa
C2801	BHF 7.130 kN	25.760	26.650	29.960	34.980
C1100	BHF 7.130 kN	39.210	39.980	43.490	45.490

จากรูปที่ 4.13 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่น ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ผลจากการทดลองพบว่าแผ่นทองแดง C1100 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงขึ้นเมื่อแรงดันน้ำมันเพิ่มมากขึ้นและทองเหลือง C2801 ยังคงใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่าทองแดงแต่กลับมีการฉีกขาดที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa และกดเหยียบชิ้นงาน 7.130 kN

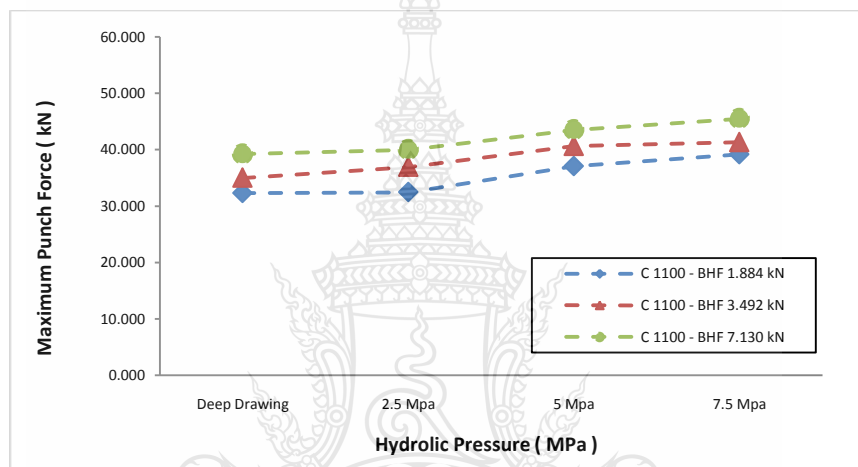


รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

การศึกษาอิทธิพลของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึกที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กในการขึ้นรูปแบบปกติและการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ในสถานะของแรงดันน้ำมันและแรงกดชิ้นงานที่แตกต่างกัน พบว่าทองแดง C1100 ไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ด้วยการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติซึ่งใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่ากระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ แต่การใช้แรงดันน้ำมันในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ พบว่าแรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้

สามารถลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นได้ด้วย ส่วนทองเหลือง C2801 ไม่สามารถลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่สภาวะ แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa และแรงกดชิ้นงานเนื่องจากแรงในการลากขึ้นรูปสูงเกินสมบัติของวัสดุ ซึ่งแรงในการลากขึ้นรูปลึกแบบไฮดรอไดนามิกส์เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากแรงกดพื้นผิว พยายามเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของพื้นผิว และทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของพื้นผิวเพิ่มขึ้นด้วย

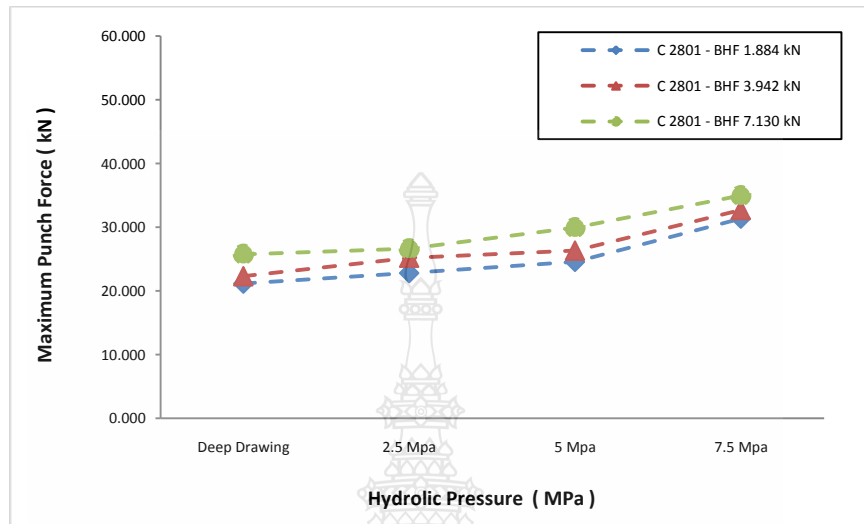
4.2 อิทธิพลของแรงดันน้ำมันที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์



รูปที่ 4.14 ค่าแรงกดพื้นผิวสูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมันต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าแรงกดพื้นผิวสูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN, 3.942 kN และ 7.130 kN ในการขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่ ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงกดพื้นผิวสูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 37.280 kN ส่วนในการขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์ ใช้แรงกดพื้นผิวสูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 42.91 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN และที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ใช้แรงกดพื้นผิวสูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด มีค่าเท่ากับ 39.280 kN และแรงกดพื้นผิวสูงสุดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงกดพื้นผิวสูงสุด เท่ากับ 32.440 kN, 36.910 kN และ 39.280 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ใช้แรงกดพื้นผิวสูงสุด เท่ากับ 37.060 kN, 40.640 kN และ 43.490 kN ตามลำดับ และ

ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด เท่ากับ 39.140 kN, 41.320 kN และ 45.490 kN ตามลำดับ ซึ่งที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.15 ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ขึ้นรูปแบบ ปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมันต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN 3.942 kN และ 7.130 kN ในการขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่ ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 22.810 kN ส่วนในการขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกไดนามิกส์ ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด 16.160 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN และที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 31.360 kN และแรงกดพื้นที่สูงสุดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด 16.160 kN, 18.313 kN และ 25.760 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด เท่ากับ 17.580 kN, 22.350 kN และ 27.960 kN ตามลำดับ ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด เท่ากับ 31.360 kN, 31.733 kN และ 33.980 kN ตามลำดับ ซึ่งที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด มีค่าสูงที่สุด

จากผลการทดลองของแรงกดแผ่นชิ้นงาน 1.884, 3.942 และ 7.130 kN ในกระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป วิเคราะห์ผลได้ว่า เมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานเพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นทุกกรณี สาเหตุเกิดจากแรงกด

ชิ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้โลหะเกิดการไหลตัวได้น้อยจึงส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปสูงเพิ่มตามและผลจากที่เพิ่มแรงกดชิ้นงานจาก 1.884 kN เป็น 3.942 kN และเพิ่มเป็น 7.130 kN ตามลำดับ ส่งผลให้รอยย่นลดลงเป็นเพราะที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN เป็นค่าที่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป

4.3 เปรียบเทียบคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติกับการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์

4.3.1 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป



(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ

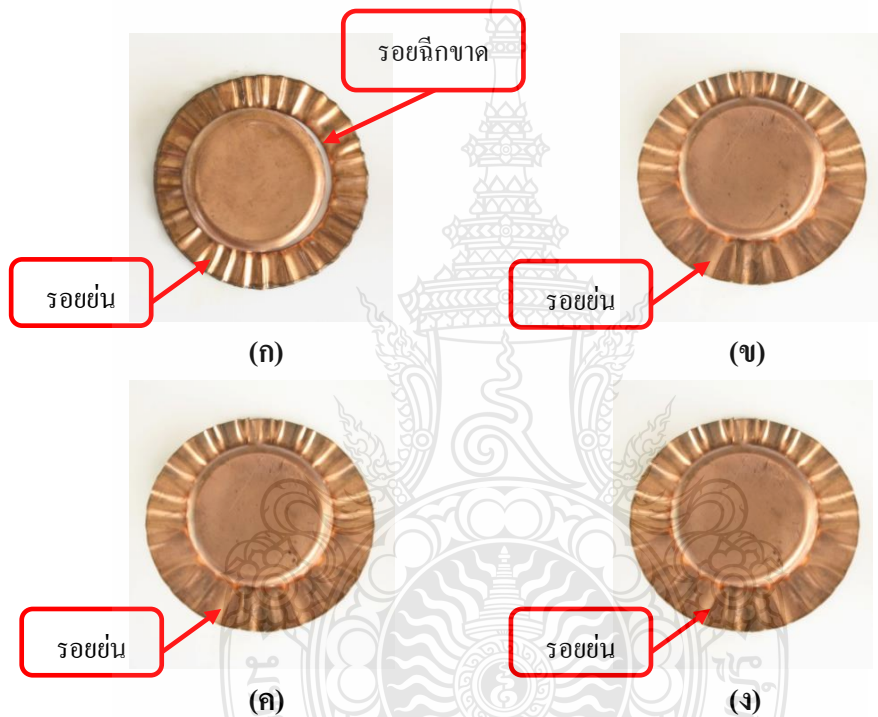
(ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์แรงดัน 2.5 MPa

(ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์แรงดัน 5 MPa

(ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.16 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์

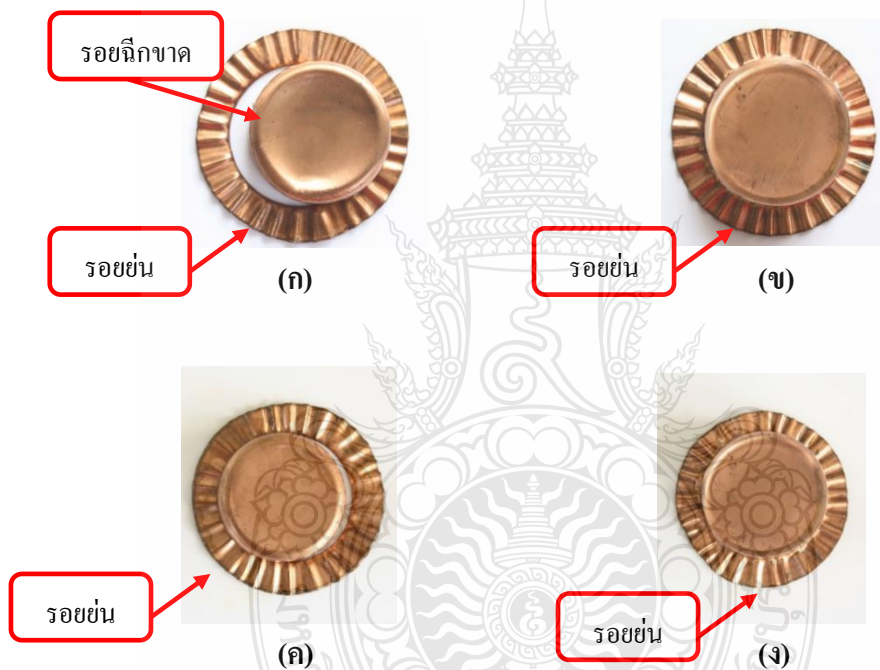
จากรูปที่ 4.16 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบคายน และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa



- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ
- (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 2.5 MPa
- (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 5 MPa
- (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.17 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

จากรูปที่ 4.17 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิกส์จะเห็นว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยลึกขนาดที่บริเวณขอบคาย รอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa



(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ

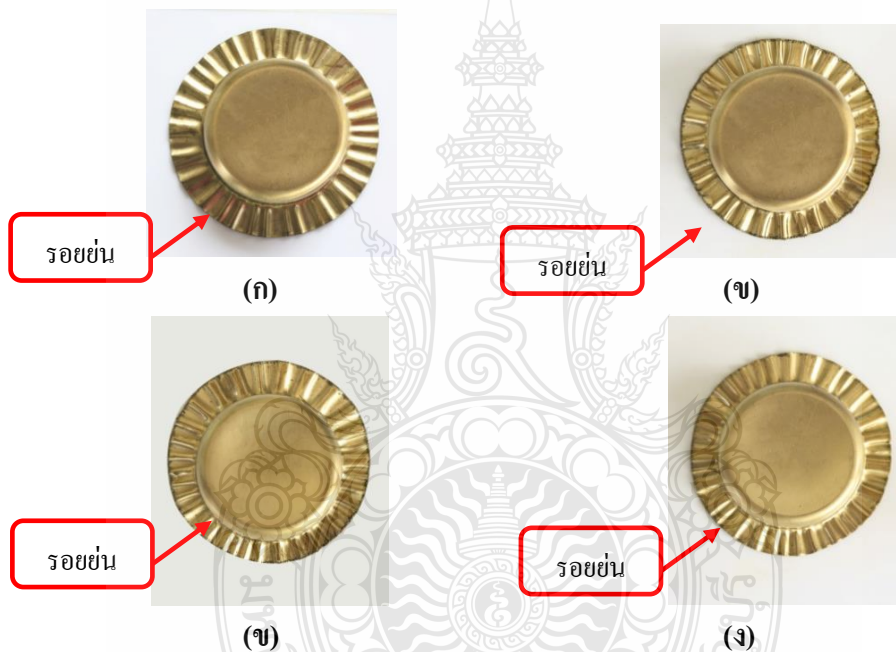
(ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิกส์แรงดัน 2.5 MPa

(ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิกส์แรงดัน 5 MPa

(ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิกส์แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.18 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิกส์

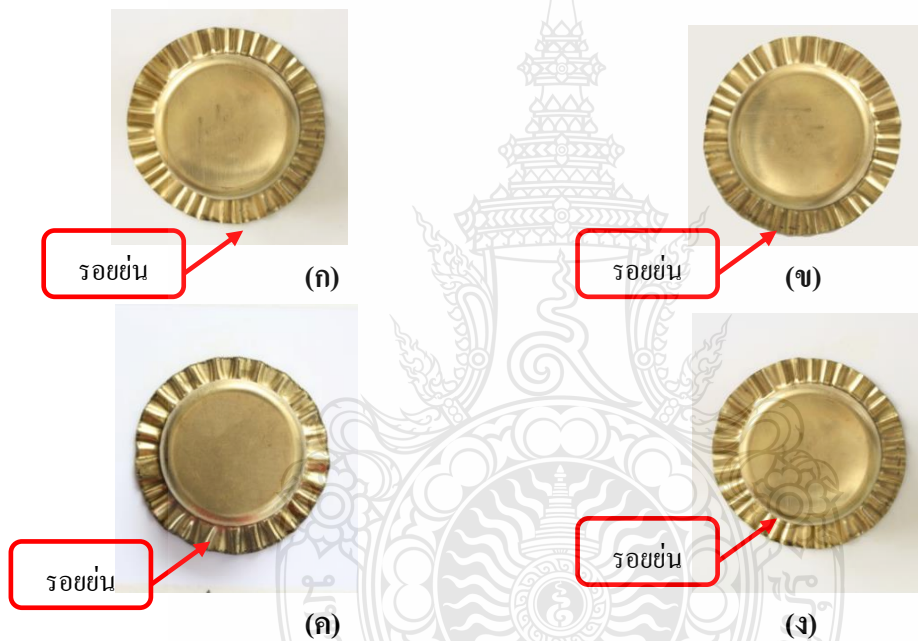
จากรูปที่ 4.18 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์จะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบคายน รอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa



- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ
- (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์แรงดัน 2.5 MPa
- (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์แรงดัน 5 MPa
- (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.19 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์

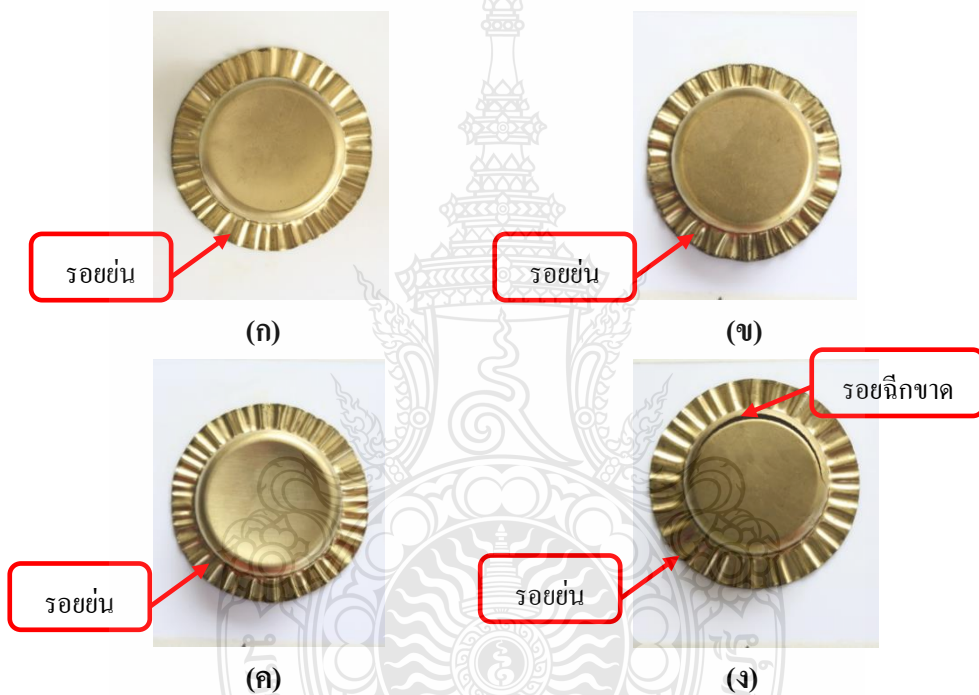
จากรูปที่ 4.19 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์จะเห็นว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบคาน รอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ และส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa



- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ
- (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์แรงดัน 2.5 MPa
- (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์แรงดัน 5 MPa
- (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.20 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

จากรูปที่ 4.20 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกจะเห็นว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติแต่จะพบว่ามีรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa



- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ
- (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 2.5 MPa
- (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 5 MPa
- (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.21 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

จากรูปที่ 4.21 ชี้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชี้นงาน 7.130 kN ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์จะเห็นได้ว่าชี้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติแต่จะพบว่ามียอย่นที่ปีกของชี้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอย่นที่ปีกของชี้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอย่นที่ปีกของชี้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากมียอย่นที่บริเวณขอบพื้นซ์ ส่วนรอย่นที่ปีกของชี้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa

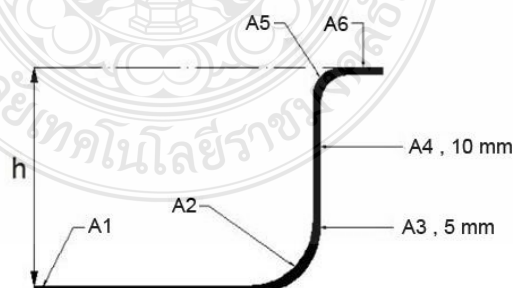
จากการทดลองพบว่าชี้นงานทองแดง C1100 ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร แรงกดเหยียบชี้นงานที่ 1.884 kN นั้นไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชี้นงานเกิดรอย่นึกขาดที่บริเวณขอบคาย รอย่นของชี้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชี้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดัน 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชี้นงานได้ ไม่เกิดรอย่นึกขาด รอย่นของชี้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปชี้นงานได้โดยไม่เกิดการนึกขาด แต่รอย่นที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่าชี้นงานทองแดงที่ลากขึ้นรูปขึ้นรูปที่แรงดัน 2.5 MPa เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชี้นงานเป็น 3.942 kN ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ที่กระบวนการปกติ เนื่องจากชี้นงานเกิดรอย่นึกขาดที่บริเวณขอบคาย รอย่นของชี้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชี้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชี้นงานได้ เกิดรอย่นึกขาดที่บริเวณขอบคาย รอย่นของชี้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการนึกขาดที่บริเวณขอบคาย ส่วนรอย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชี้นงานเป็น 7.130 kN ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชี้นงานเกิดรอย่นึกขาดที่บริเวณขอบคาย รอย่นของชี้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชี้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชี้นงานได้ เกิดรอย่นึกขาดที่บริเวณขอบคาย รอย่นของชี้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการนึกขาดที่บริเวณขอบคาย ส่วนรอย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่า R (R-Value หรือ Plastic Strain Ratio) ในตารางที่ 3.1

ชี้นงานทองเหลือง C2801 ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร แรงกดเหยียบชี้นงานที่ 1.884 kN นั้นไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชี้นงานเกิดรอย่นึกขาดที่บริเวณขอบคาย รอย่นของชี้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชี้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่

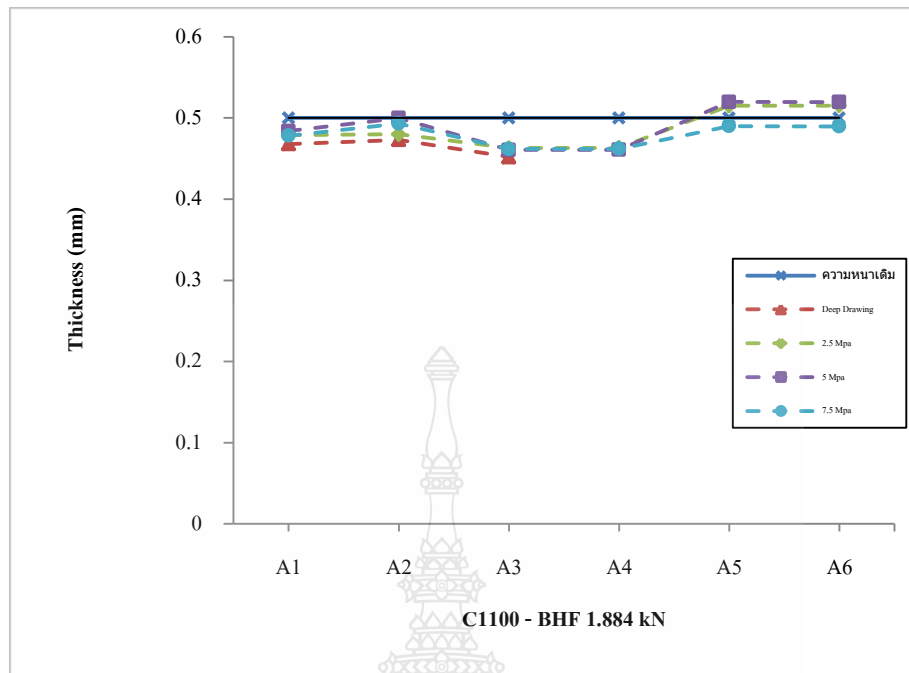
สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ ไม่เกิดรอยฉีกขาด รอยย่นของขึ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้โดยไม่เกิดการฉีกขาด แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่าขึ้นงานทองแดงที่ลากขึ้นรูปขึ้นรูปที่แรงดัน 2.5 MPa เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบขึ้นงานเป็น 3.942 kN ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ที่กระบวนการปกติ เนื่องจากขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบคาย รอยย่นของขึ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากขึ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบคาย รอยย่นของขึ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบคาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบขึ้นงานเป็น 7.130 kN ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบคาย รอยย่นของขึ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากขึ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบคาย รอยย่นของขึ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบคาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่า R-Value หรือ Plastic Strain Ratio ในตารางที่ 3.2

4.3.2 การวัดความหนาของขึ้นงาน

การวัดความหนาขึ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติและการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอลิกจะทำการวัดความหนาของขึ้นงานทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.19 แสดงตำแหน่งของการวัดความหนาของขึ้นงานหลังการขึ้นรูป ณ ตำแหน่งต่างๆ

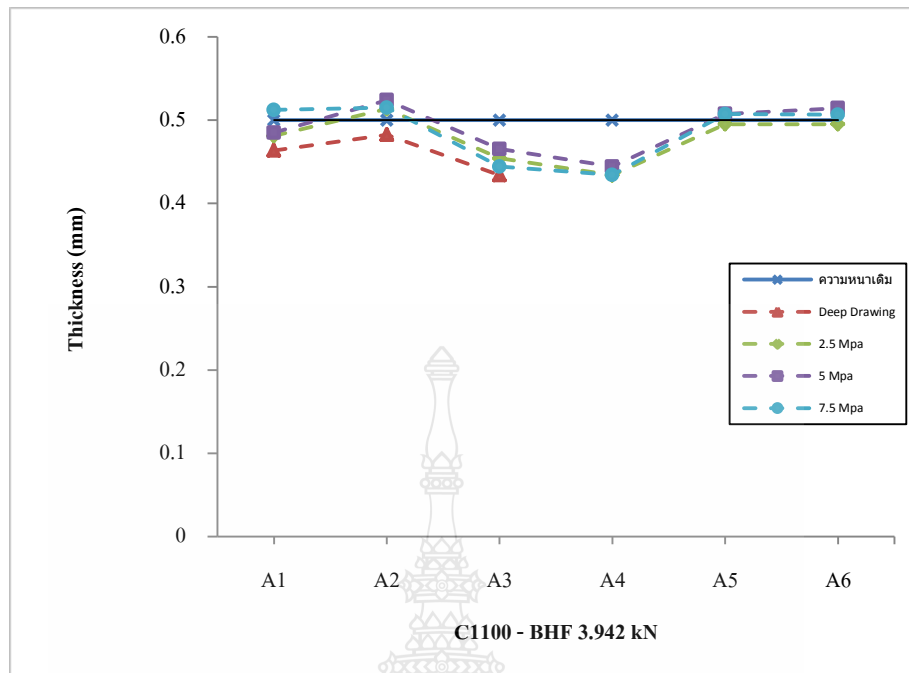


รูปที่ 4.22 ตำแหน่งของการวัดความหนาของขึ้นงานหลังการขึ้นรูป [5]



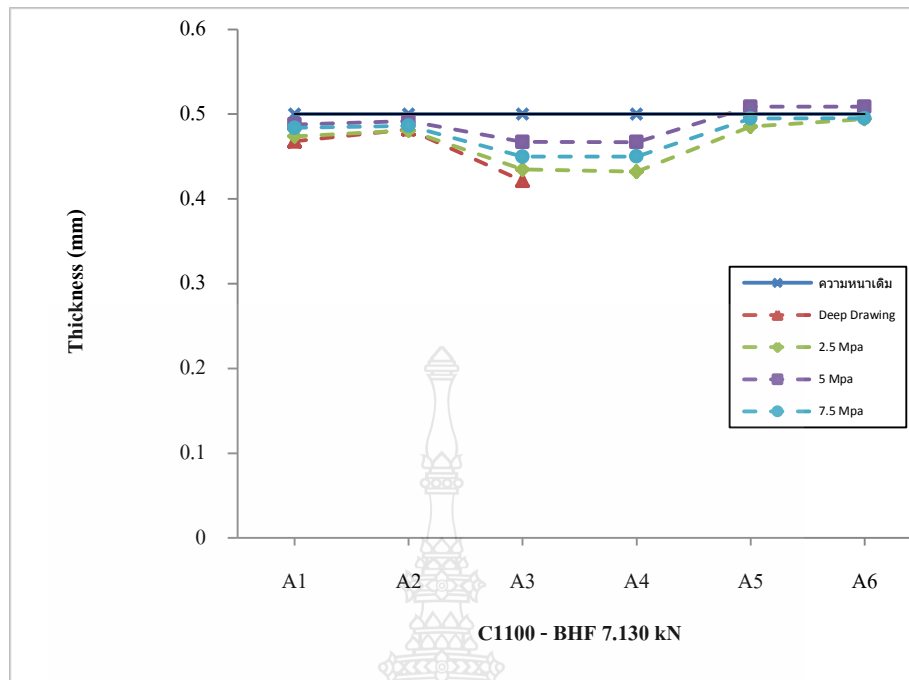
รูปที่ 4.23 ความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN

จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ผลการทดลองพบว่า ที่จุด A2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.458 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.474 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.480 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.493 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



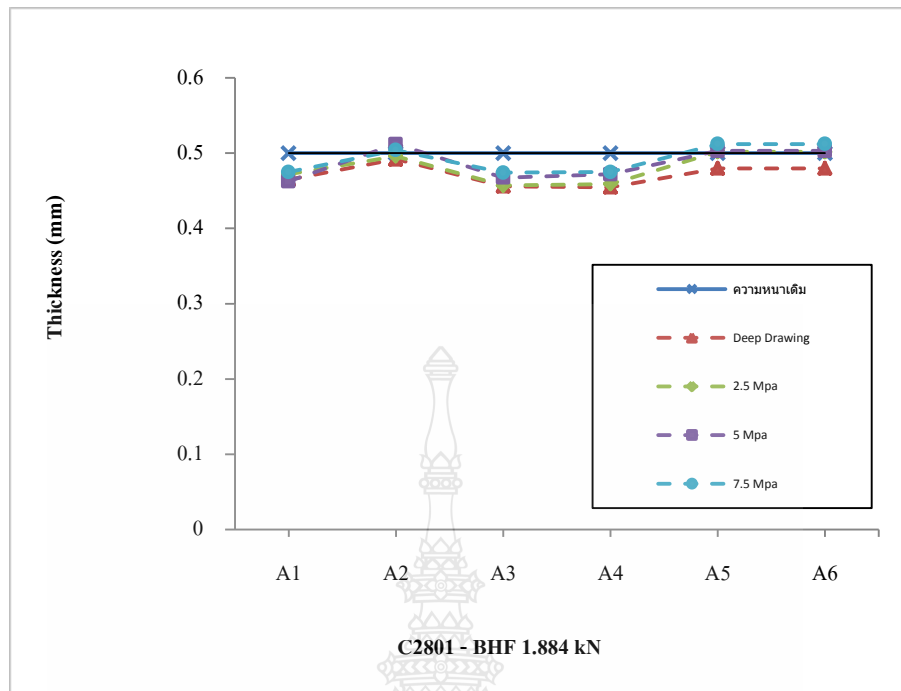
รูปที่ 4.24 ความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ผลการทดลองพบว่า ที่จุด A2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.454 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.475 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 MPa และ 7.5 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.485 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.490 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



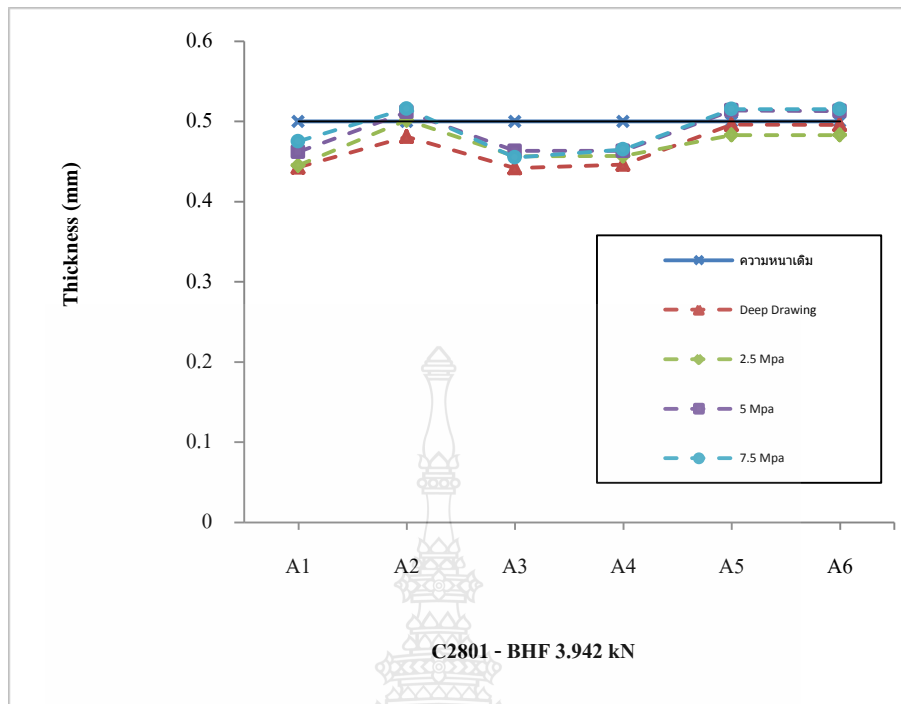
รูปที่ 4.25 ความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

จากรูปที่ 4.25 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป แผ่นทองแดง C1100 แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ผลการทดลองพบว่า ในการวัดความหนาการลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.456 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.465 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 MPa และ 7.5 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.478 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.487 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



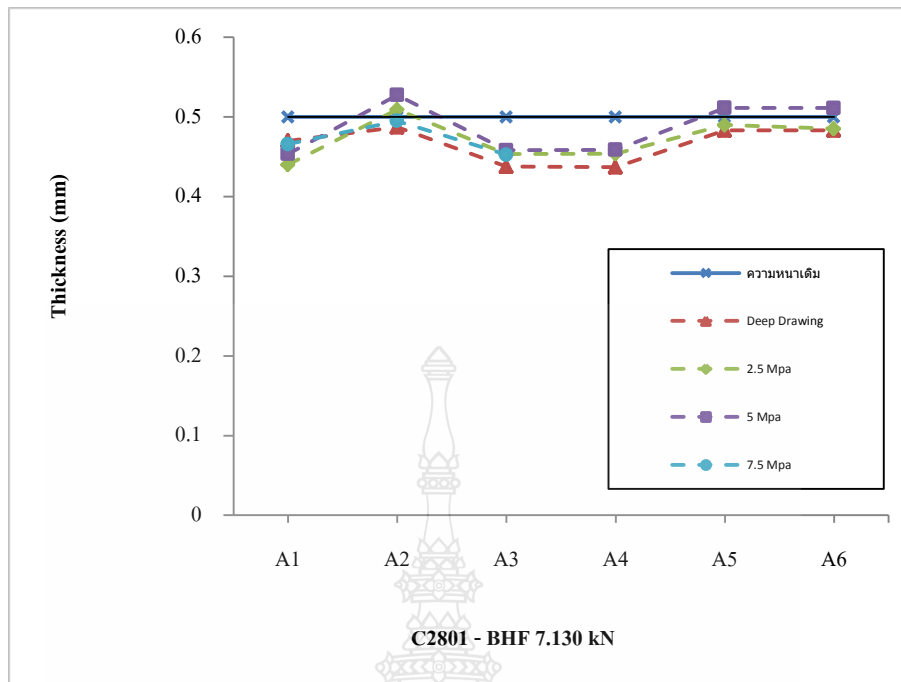
รูปที่ 4.26 ความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN

จากรูปที่ 4.26 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN ผลการทดลองพบว่า ที่จุด A2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.457 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.470 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 MPa และ 7.5 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.486 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.492 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



รูปที่ 4.27 ความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN

จากรูปที่ 4.27 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN ผลการทดลองพบว่า ที่จุด A2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาดำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.462 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.471 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 MPa และ 7.5 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.474 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.487 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



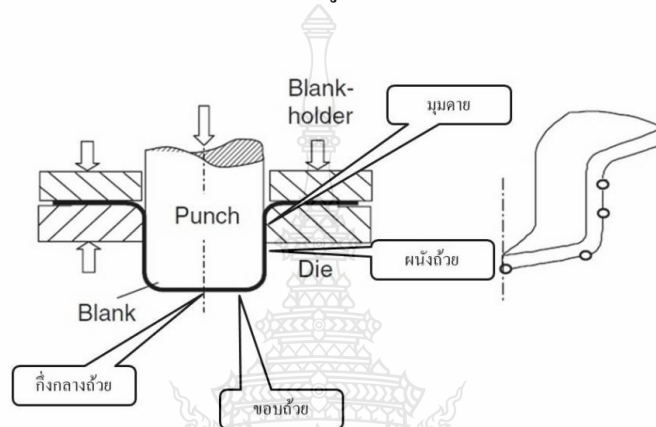
รูปที่ 4.28 ความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

จากรูปที่ 4.28 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป แผ่นทองเหลือง C2801 แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามกำหนด เกิดการฉีกขาด สามารถวัดความหนาได้ 3 จุด คือ จุดที่ 1 , จุดที่ 2 และจุดที่ 3 ในการวัดความหนาการลากขึ้นรูปแบบปกติ ค่าเฉลี่ยความหนา 0.475 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.480 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 MPa และ 7.5 MPa ผลการทดลองพบว่าที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.488 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.491 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด

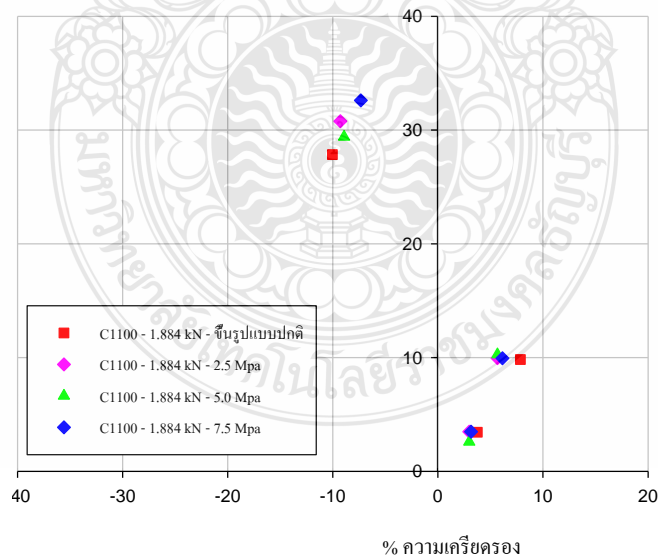
4.3.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน

ความเครียดที่ผิวชิ้นงานจากการวัดขนาดกริดวงกลม ในตำแหน่งตามภาพที่ 4.22 แล้วคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลมในแต่ละตำแหน่ง แล้วจึงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ

ความเครียดในแต่ละตำแหน่ง จากข้อมูลการทดลองในภาคผนวก ก และผลการทดลองความเครียดสูงสุดที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน คือจุดของผนังด้านข้างจนไปถึงมุมคาย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นหลัก และในการทดลองปึกถ้วยไม่ทำการวัดความหนา เพราะเกิดรอยย่นในทุกสภาวะจนไม่สามารถทำการวัดค่าความหนาได้ หลังจากนั้นจึงเขียนแผนภาพความเครียด (Strain Diagram) จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลมสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่จุดระนาบความเครียด (Plane Strain) และการเปลี่ยนรูปแนวเฉือน (Shear Deformation)

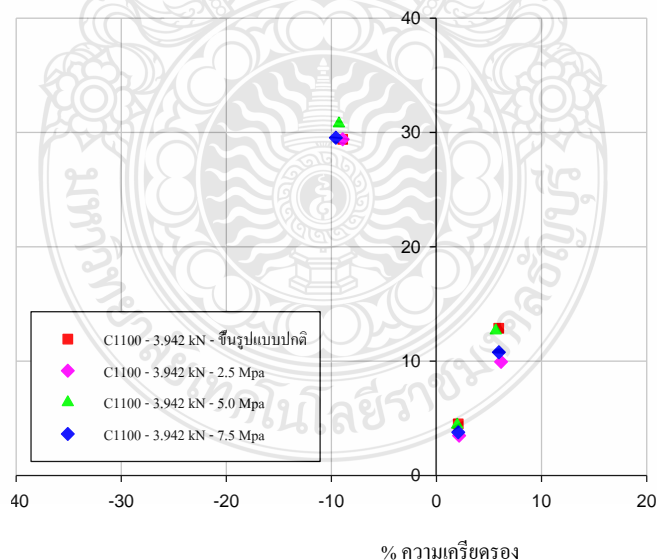


รูปที่ 4.29 ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม [11]



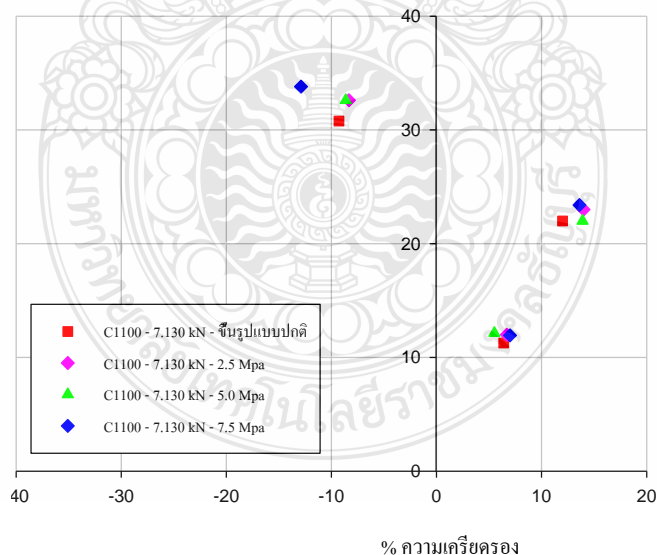
รูปที่ 4.30 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN

รูปที่ 4.30 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จาก ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุใน แนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 3.439 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 2.747 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณกันด้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 9.826 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 7.852 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 27.842 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -10.039 เปอร์เซ็นต์ มีการยึดตัวของก กริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa พบการยึดตัวของวัสดุ ในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 3.483 , 3.595 และ 3.478 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 1.985, 1.985 และ 2.150 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณกันด้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 9.953, 10.276 และ 9.936 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียด รอง 5.672, 6.577 และ 6.143 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 30.786, 29.408 และ 32.608 เปอร์เซ็นต์ และความเครียดรอง -9.284, -8.933 และ -7.033 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยึดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณ ผนังด้านข้างของชิ้นงาน



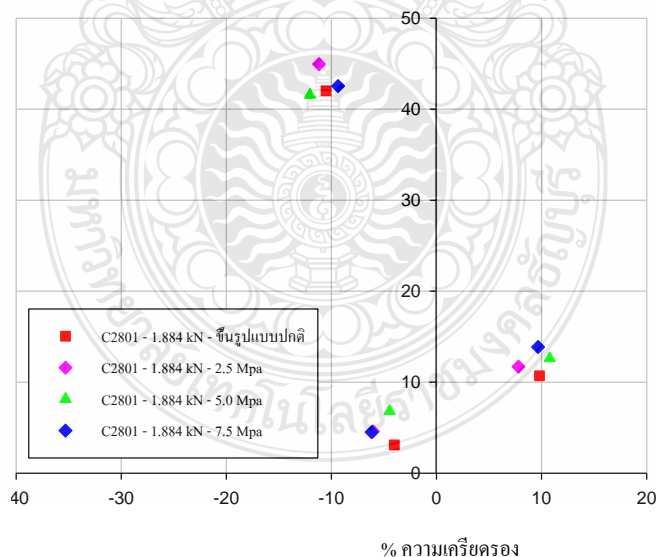
รูปที่ 4.31 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN

รูปที่ 4.31 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จาก ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุใน แนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 พบว่ามีค่าความเครียดหลักที่ 4.508 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 2.072 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 12.879 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 5.921 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 29.408 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -8.933 เปอร์เซ็นต์ มีการยึดตัวของกริด วงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้น รูปด้วยกระบวนการไฮดรไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa พบการยึดตัวของเนื้อวัสดุ ในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 3.478, 4.436 และ 3.772 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 2.150, 1.975 และ 2.077 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 9.936, 12.673 และ 10.778 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 6.143, 5.646 และ 5.934 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียด หลักเท่ากับ 29.048, 30.786 และ 29.543 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าค่าความเครียดรองมีค่า -8.933, -9.284 และ -9.575 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยึดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลัก สูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน



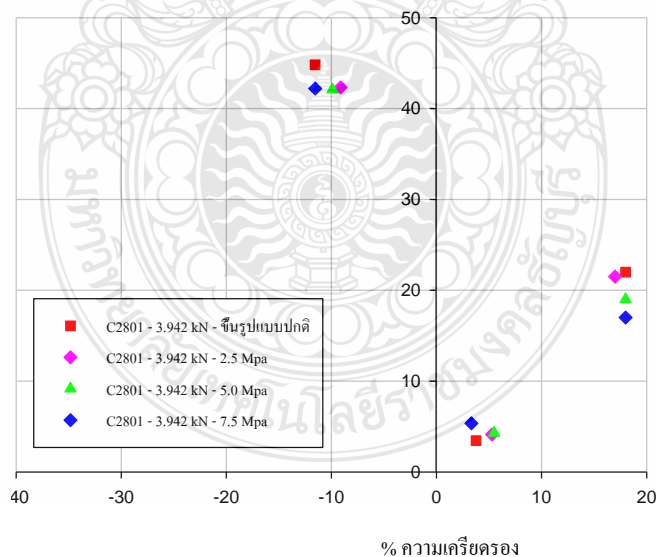
รูปที่ 4.32 แผ่นภาพตัดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

รูปที่ 4.32 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จาก ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุใน แนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 พบว่าค่าความเครียดหลักมีค่า 11.272 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 6.401 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 21.987 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 11.812 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 30.786 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -9.285 เปอร์เซ็นต์ มีการยึดตัวออกของ กริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa พบว่าการยึดตัวของเนื้อ วัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 11.997, 12.140 และ 11.935 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 6.689, 5.510 และ 7.001 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็น บริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 23.10, 21.8 และ 33.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 14.28, 13.939 และ 13.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 30.786, 32.608 และ 33.809 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ความเครียดรองมีค่า -8.33, -8.603 และ -12.884 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยึดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลัก สูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน



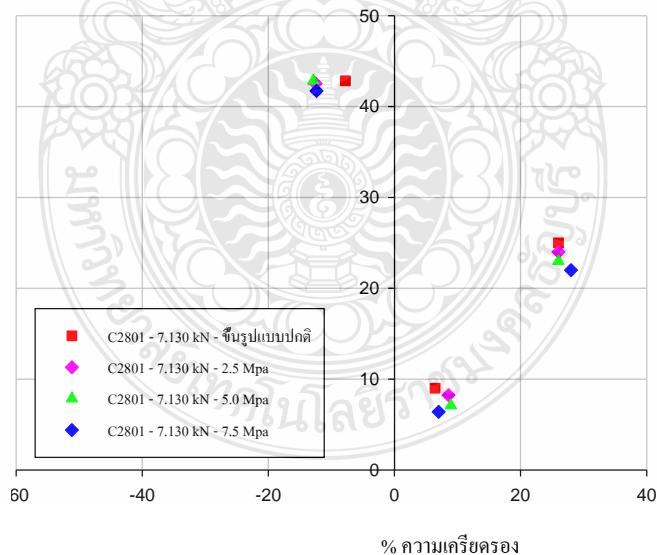
รูปที่ 4.33 แผ่นภาพตัดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN

รูปที่ 4.33 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเคี้ยวตรงของชิ้นงานที่ได้จาก ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุใน แนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูป ตำแหน่งที่ 1 ค่าความเครียดหลัก 3.1056 เปอร์เซ็นต์ ความเคี้ยวตรง -4.076 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 10.76 เปอร์เซ็นต์ ความเคี้ยวตรง 9.8 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 42.02 เปอร์เซ็นต์ ความเคี้ยวตรง -10.52 เปอร์เซ็นต์ มีการยึดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลัก สูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮ ดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและ แกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 4.5976, 6.83 และ 4.502 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเคี้ยวตรง -6.0448, -4.46 และ -6.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 11.7, 12.6 และ 13.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ ค่าความเคี้ยวตรง 7.8, 10.78 และ 9.69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 44.9, 241.56 และ 42.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเคี้ยวตรง -10.51, 12.03 และ 9.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยึดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณ ผนังด้านข้างของชิ้นงาน



รูปที่ 4.34 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN

รูปที่ 4.34 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จาก ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุใน แนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 พบว่ามีค่าความเครียดหลักที่ 3.448 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 4.124 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณกันถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 22.08 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 18.18 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่า ความเครียดหลักเท่ากับ 44.8 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -10.51 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวของ กิริตวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อ วัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 4.124, 4.3 และ 5.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 5.28, 5.5 และ 3.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณกันถ้วย ตำแหน่ง ที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 21.15, 18.8 และ 17.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 17.28, 18.09 และ 18.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 42.32, 42.088 และ 41.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -9.12, -9.9 และ -11.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวของกิริตวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณ ผนังด้านข้างของชิ้นงาน



รูปที่ 4.35 แผ่นภาพตัดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

รูปที่ 4.35 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเคี้ยวตรงของชิ้นงานที่ได้จาก ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุใน แนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 ความเครียดหลักที่ 8.998 เปอร์เซ็นต์ ความเคี้ยวตรง 6.44 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 25.08 เปอร์เซ็นต์ ความเคี้ยวตรง 26.02 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 42.884 เปอร์เซ็นต์ ความเคี้ยวตรง -7.72 เปอร์เซ็นต์ มีการยึดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลัก สูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ ไฮโดรไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลัก และแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 8.234, 7.092 และ 6.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเคี้ยวตรง 8.575, 8.932 และ 7.03 เปอร์เซ็นต์ บริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 ค่าความเครียดหลัก 24.10, 23.8 และ 22.06 เปอร์เซ็นต์ ความเคี้ยวตรง 25.88, 26.09 และ 28.04 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลัก 42.54, 42.54 และ 41.72 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเคี้ยวตรง -12.49, -12.87 และ -12.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยึดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอย คอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเรื่องอิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ สามารถสรุปผลการทดลองสำหรับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลในการขึ้นรูปคือ แรงกดชิ้นงาน และแรงดันน้ำมัน ซึ่งมีผลต่อกระบวนการการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ โดยทำการศึกษาดังผลกระทบต่อ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานคุณภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปการทดลองจากผลการศึกษาวิจัยเรื่อง อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ โดยทำการทดลองลากขึ้นรูปลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 2 ชนิด ได้แก่ ทองเหลือง C2801 และทองแดง C1100 ที่ความหนา 0.5 mm ลากขึ้นรูปลึงเป็นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก แรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 2.5, 5.0 และ 7.5 MPa และแรงกดชิ้นงาน 3 ระดับ คือ 1.884, 3.492 และ 7.130 kN ทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อแรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่สูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงาน ความหนาของชิ้นงาน หลังการขึ้นรูป และความเครียดที่ผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป สามารถสรุป อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 อิทธิพลของแรงลากขึ้นรูป พบว่าแรงลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ นั้นใช้แรงลากขึ้นรูปมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันในห้องแม่พิมพ์ตายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วยเพื่อที่จะเอาชนะแรงดันน้ำมันในห้องตายแต่แรงลากขึ้นรูปที่เพิ่มมากขึ้นนั้นกลับส่งผลให้วัสดุทองแดง C1100 ที่ไม่สามารถลากขึ้นรูปแบบปกติได้สามารถขึ้นรูปได้

5.1.2 อิทธิพลของแรงกดชิ้นงาน แรงกดพื้นที่สูงสุดของการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกมีแรงกดพื้นที่สูงสุดมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้น แรงกดพื้นที่สูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นตาม ทำให้โลหะเกิดการไหลตัวได้น้อย และผลจากการเพิ่มแรงกดชิ้นงานส่งผลให้รอยยับลดลง สังเกตได้จากทองแดง C1100 ที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ในสภาวะปกติ แต่สามารถขึ้นรูปได้ในสภาวะของไฮโดรไดนามิกส์ ส่วนทองเหลือง C2801 แรงกดพื้นที่แรงดันน้ำมัน

7.5 MPa แรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 7.130 kN ทำให้มีแรงกดพ่นซ์มากขึ้นไปเพื่อที่เอาชนะแรงดันน้ำมัน 7.5 MPa จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีรอยฉีกขาด

5.1.3 การเปรียบเทียบชิ้นงานหลังการในการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์มีการเปลี่ยนแปลงความหนา ความเครียดหลัก และความเครียดรองน้อยกว่าชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ และเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์คาย ในกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก มีผลต่อความเครียดบนผิวชิ้นงาน ทำให้ความหนาชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลงน้อยลง

5.1.4 การเปรียบเทียบการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ ของแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 2 ชนิดพบว่า

1. ทองแดง C1100 ความหนา 0.5 มม ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติที่แรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 1.884, 3.492 และ 7.130 kN ได้ แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 1.884 kN ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 3.492 kN ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 7.130 kN ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa โดยที่รอยย่นของชิ้นงานไม่แตกต่างกัน

2. ทองเหลือง C2801 ที่ความหนา 0.5 มม.สามารถขึ้นรูปได้ในสภาวะ การลากขึ้นรูปลึกปกติ (Deep Drawing) และ สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 1.884 kN ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์ที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 3.492 kN ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa, 5 MPa และ 7.5 MPa และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 7.130 kN ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa และ 5 MPa โดยที่รอยย่นของชิ้นงานไม่แตกต่างกัน แต่ไม่สามารถขึ้นรูปที่สภาวะแรงกดเหยียบชิ้นงาน 7.130 kN และแรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 7.5 MPa เนื่องจากในสภาวะนี้ชิ้นงานมีรอยฉีกขาดเกิดขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง

5.2.1 ก่อนการเริ่มปฏิบัติงานทุกครั้งต้องตรวจสอบระดับของของเหลวภายในถังควรวอยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยดูจากเกจวัดระดับน้ำมันควรมีน้ำมันอย่างน้อย 1/3 ของเกจวัด (ข้อมูลจากการสอบถามผู้ผลิต)

5.2.2 ในช่วงที่พื้นที่เคลื่อนลงมากคขึ้นงานตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้ และปล่อยน้ำมันเข้าสู่ภายในแม่พิมพ์คาย ต้องสังเกตว่าพื้นที่สัมผัสกับชิ้นงานหรือไม่ หรือพื้นที่อยู่ตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้หรือไม่ เพราะกรณีที่พื้นที่ไม่อยู่ตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้ จะส่งผลกระทบต่อรูปทรง และคุณภาพของชิ้นงาน

5.2.3 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ควรคำนึงถึงผลกระทบของแรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากการปฏิบัติงานภายใต้สภาวะของแรงดันน้ำมันที่สูง ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของพื้นที่ลงไปแทนที่ปริมาตรน้ำมันในแม่พิมพ์คาย

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

5.3.1 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการขึ้นรูปที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกลงด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์

5.3.2 ศึกษาการกำหนดระดับแรงดันน้ำมันที่ให้ผลดีที่สุดในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์

5.3.3 ศึกษาการกำหนดแรงกดชิ้นงานที่ให้ผลดีที่สุดในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์

5.3.4 ศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำมัน ในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกลงด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์

5.3.5 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของแม่พิมพ์ เช่น ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ และมุมคาย ที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกลงด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกส์

5.3.6 ศึกษาการประยุกต์ใช้ระเบียบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

รายการอ้างอิง

- [1] Kang, D. **A Study on Hydrodynamic Deep Drawing Equipment**, Journal Materials Processing Technology, 2000, 101, p 21
- [2] Lang, L.H., **Investigation into the Effect of Pre-Bulging during Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto The Blank**, International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application, 2004, 44, p 649
- [3] 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, 167, p 191
- [4] Ajay, D. and Yadav, A., **Process Analysis and Design in Stamping Sheet Hydroforming**, Ph. D. Thesis, Philosophy Engineer, The Ohio State University, 2008, pp193-196
- [5] กฤษดา บรรเทาพิษ, **การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555
- [6] มอก.977-2551 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่
- [7] International Standard ISO 3105 : 1994 Glass Capillary Kinematic Viscometers Specifications and Operating Instructions
- [8] สุริยา น้ำแก้ว, **อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก** ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555
- [9] Buranathiti, T., Cao, J., Xia, Z.C., Chen, W., **“Probabilistic Design in a Sheet Metal Stamping Process under Failure Analysis,”** NUMISHEET 2005, Detroit, MI, August 15-19, 2005, pp. 867-872
- [10] Standard JIS B 5012 : 2008 Coild Helical Spring for Press Die
- [11] Tschaetsch, H., **Metal Forming Practise**, Verlag Berlin Heidelberg Germany, Springer, 2006, pp. 142-183

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [12] 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, 44, p 495
- [13] Marciniak, Z Duncan, J.L. and Hu, S.J., **Mechanics of Sheet Metal Forming**, House Jordan Hill Oxford, Butterworth-Heinemann, Second Edition, 2002, pp.30-128
- [14] อภิชาติ แสนรัชฎากร, การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อขบวนการลากขึ้นรูปโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [15] Kurt Lange, **Handbook of Metal Forming**, McGraw-Hill The United States of America, McGraw-Hill, 1985, pp. 20.1-20.69
- [16] Lang, L.H., “**Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming,**” Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151, pp 165-166.
- [17] Joakim L., “**Numerical simulation of tube hydroforming**”, Ph. D. Thesis, Civil and environmental engineering, Lulea university of technology, 2004, pp 9-11.
- [18] Lihui L., “**Investigation into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure Part I. Experimental Observations of the Forming Process of Aluminum Alloy,**” Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148, pp 119-131.
- [19] รศ.ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, **กลศาสตร์ของไหล**, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร, 2010.
- [20] ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร, **ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม**, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ซีเอ็ด, กรุงเทพมหานคร, หน้าที่ 11-119.
- [21] เศรษฐ อุทธิยัง, การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่น, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [22] สวัสดิ์ โสตามุข, การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2550.

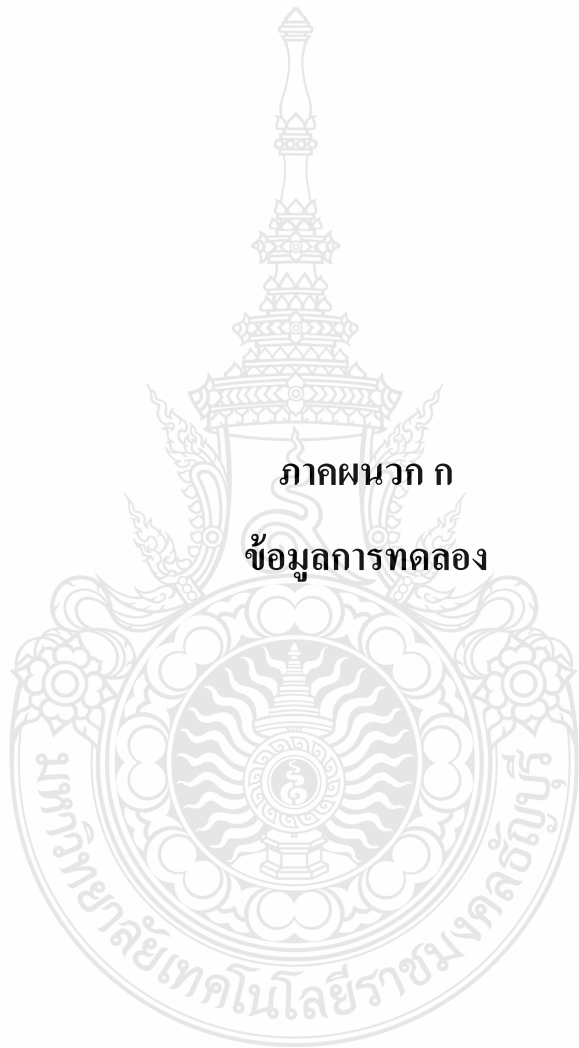
รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [23] ชงชัย เฟ็งจันทร์ดี, อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดโดยการทำงานด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข, ปรียญานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [24] ไพนุลย์ หาญมนต์, การศึกษารัศมีด้ายที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกลมมีปีกของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 46, ปีพ.ศ.2551, หน้า 11-18.
- [25] 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.
- [26] วิเชียร เกื้อนเครือวัลย์ และ ศุภเอก ประมูลมาก, การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่มีผลต่องานขึ้นรูปด้วย, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา, หน้า 653-658.
- [27] Huiting W., Lin G., Minghe C., **Hydrodynamic Deep Drawing Process Assisted by Radial Pressure with Inward Flowing Liquid**, International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53, pp 793-799.
- [28] ธนสาร อินทรกำจรชัย และ สุวัฒน์ จีระธีรนาถ, การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมขึ้นส่วนยานยนต์, การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 2 (CIOD 2011), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 11 - 12 พฤษภาคม 2554, หน้า 1.
- [29] S.H. Zhang , M.R. Jensen , J. Danckert , K.B. Nielsen , D.C. Kang , L.H. Lang **Analysis of the Hydromechanical Deep Drawing of Cylindrical Cups** Journal of Materials Processing Technology 103 (2000) 367-373.
- [30] Genick Bar–Meir, **Basics of Fluid Mechanics**, GNU Free Documentation License, USA, 2008



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง



ข้อมูลการทดลองตามลำดับขั้นตอนการทดลองของตารางที่ 3.2

ตารางที่ ก.1 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะ กดพื้นที่ลิค		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรงลาก ขึ้นรูป (kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรงลาก ขึ้นรูป (kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.911	4.08	27.21	2.092	7.42	49.49	4.022
2	2.50	2.03	13.56	7.765	4.24	28.25	11.499	7.71	51.39	13.164
3	3.75	2.11	14.07	7.857	4.39	29.30	11.734	7.99	53.30	13.414
4	5.00	2.19	14.57	8.335	4.55	30.35	11.499	8.28	55.20	14.022
5	6.25	2.26	15.07	9.949	4.71	31.39	10.784	8.57	57.10	14.507
6	7.50	2.34	15.57	8.239	4.87	32.44	11.499	8.85	59.01	14.877
7	8.75	2.41	16.08	7.955	5.02	33.48	11.024	9.14	60.91	15.129
8	10.00	2.49	16.58	8.713	5.18	34.53	10.784	9.42	62.81	15.614
9	11.25	2.56	17.08	7.479	5.34	35.58	11.499	9.71	64.72	15.627
10	12.50	2.64	17.58	6.907	5.49	36.62	11.259	9.99	66.62	15.522
11	13.75	2.71	18.09	7.477	5.65	37.67	11.499	10.28	68.52	15.654
12	15.00	2.79	18.59	7.857	5.81	38.72	12.214	10.56	70.43	16.377
13	16.25	2.86	19.09	7.763	5.96	39.76	11.499	10.85	72.33	16.507
14	17.50	2.94	19.59	8.523	6.12	40.81	11.734	11.14	74.24	16.287
15	18.75	3.01	20.10	11.659	6.28	41.86	12.214	11.42	76.14	16.417

ขึ้นรูปลิค 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ; 20.1% = แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 11.685 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 14.655 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 16.697 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด

ตารางที่ ก.2 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 2.5 MPa ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะ กดพื้นชั้ล็ก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	1.860	4.08	27.21	2.190	7.42	49.49	2.862
2	2.50	2.03	13.56	9.290	4.24	28.25	10.332	7.71	51.39	15.716
3	3.75	2.11	14.07	9.290	4.39	29.30	10.582	7.99	53.30	15.808
4	5.00	2.19	14.57	8.810	4.55	30.35	11.190	8.28	55.20	16.286
5	6.25	2.26	15.07	9.770	4.71	31.39	11.675	8.57	57.10	17.900
6	7.50	2.34	15.57	9.770	4.87	32.44	12.045	8.85	59.01	16.190
7	8.75	2.41	16.08	8.340	5.02	33.48	12.297	9.14	60.91	15.906
8	10.00	2.49	16.58	13.090	5.18	34.53	12.782	9.42	62.81	16.664
9	11.25	2.56	17.08	8.340	5.34	35.58	12.795	9.71	64.72	15.430
10	12.50	2.64	17.58	6.910	5.49	36.62	12.690	9.99	66.62	14.858
11	13.75	2.71	18.09	8.810	5.65	37.67	12.822	10.28	68.52	15.428
12	15.00	2.79	18.59	10.240	5.81	38.72	13.545	10.56	70.43	15.808
13	16.25	2.86	19.09	10.240	5.96	39.76	13.675	10.85	72.33	15.714
14	17.50	2.94	19.59	10.240	6.12	40.81	13.455	11.14	74.24	16.474
15	18.75	3.01	20.10	13.090	6.28	41.86	13.585	11.42	76.14	19.610

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน
 20.1% = แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 11.685 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการ
 นึกขาด; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 14.655 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการนึกขาด
 และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 16.697 kN = แรงลากขึ้นรูป (ขึ้นงานเกิดการนึกขาด

ตารางที่ ก.3 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 5 MPa ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะ กดพื้นชั้ล็ก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	1.645	4.08	27.21	1.043	7.42	49.49	2.657
2	2.50	2.03	13.56	11.645	4.24	28.25	13.897	7.71	51.39	17.657
3	3.75	2.11	14.07	11.165	4.39	29.30	13.989	7.99	53.30	17.177
4	5.00	2.19	14.57	11.645	4.55	30.35	14.467	8.28	55.20	17.657
5	6.25	2.26	15.07	11.165	4.71	31.39	16.081	8.57	57.10	17.177
6	7.50	2.34	15.57	10.215	4.87	32.44	14.371	8.85	59.01	16.227
7	8.75	2.41	16.08	11.165	5.02	33.48	14.087	9.14	60.91	17.177
8	10.00	2.49	16.58	10.685	5.18	34.53	14.845	9.42	62.81	16.697
9	11.25	2.56	17.08	10.215	5.34	35.58	13.611	9.71	64.72	16.227
10	12.50	2.64	17.58	9.735	5.49	36.62	13.039	9.99	66.62	15.747
11	13.75	2.71	18.09	10.685	5.65	37.67	13.609	10.28	68.52	16.697
12	15.00	2.79	18.59	11.645	5.81	38.72	13.989	10.56	70.43	17.657
13	16.25	2.86	19.09	10.685	5.96	39.76	13.895	10.85	72.33	16.697
14	17.50	2.94	19.59	10.215	6.12	40.81	14.655	11.14	74.24	16.227
15	18.75	3.01	20.10	11.685	6.28	41.86	14.655	11.42	76.14	16.697

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ; 20.1% แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 11.685 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการน็อกขาด; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 14.655 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการน็อกขาด และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 16.697 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการน็อกขาด

ตารางที่ ก.4 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 7.5 MPa ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะ กดพื้นที่ (%)		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	2.635	4.08	27.21	3.786	7.42	49.49	2.750
2	2.50	2.03	13.56	11.115	4.24	28.25	14.316	7.71	51.39	17.660
3	3.75	2.11	14.07	10.635	4.39	29.30	15.266	7.99	53.30	13.860
4	5.00	2.19	14.57	11.115	4.55	30.35	15.266	8.28	55.20	20.040
5	6.25	2.26	15.07	11.115	4.71	31.39	14.786	8.57	57.10	7.680
6	7.50	2.34	15.57	11.115	4.87	32.44	15.266	8.85	59.01	13.860
7	8.75	2.41	16.08	11.115	5.02	33.48	15.746	9.14	60.91	41.890
8	10.00	2.49	16.58	11.115	5.18	34.53	15.746	9.42	62.81	17.190
9	11.25	2.56	17.08	11.115	5.34	35.58	15.266	9.71	64.72	22.410
10	12.50	2.64	17.58	11.115	5.49	36.62	15.266	9.99	66.62	19.560
11	13.75	2.71	18.09	11.115	5.65	37.67	15.746	10.28	68.52	19.090
12	15.00	2.79	18.59	10.155	5.81	38.72	16.216	10.56	70.43	19.560
13	16.25	2.86	19.09	11.115	5.96	39.76	16.216	10.85	72.33	18.140
14	17.50	2.94	19.59	11.115	6.12	40.81	15.746	11.14	74.24	19.560
15	18.75	3.01	20.10	11.115	6.28	41.86	15.746	11.42	76.14	19.560

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ; 20.1% = แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 11.115kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการน็อกขาด; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 15.746 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการน็อกขาด และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 19.560 kN = แรงลากขึ้นรูป ขึ้นงานเกิดการน็อกขาด

ตารางที่ ก.5 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะ กดพื้นรีด		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.794	4.08	27.21	5.472	7.42	49.49	8.626
2	2.50	2.03	13.56	22.194	4.24	28.25	26.474	7.71	51.39	26.726
3	3.75	2.11	14.07	24.094	4.39	29.30	24.259	7.99	53.30	29.096
4	5.00	2.19	14.57	23.144	4.55	30.35	25.269	8.28	55.20	29.096
5	6.25	2.26	15.07	21.724	4.71	31.39	25.982	8.57	57.10	26.726
6	7.50	2.34	15.57	23.624	4.87	32.44	21.764	8.85	59.01	27.196
7	8.75	2.41	16.08	22.194	5.02	33.48	21.764	9.14	60.91	30.996
8	10.00	2.49	16.58	23.144	5.18	34.53	22.952	9.42	62.81	34.326
9	11.25	2.56	17.08	23.624	5.34	35.58	23.544	9.71	64.72	34.326
10	12.50	2.64	17.58	23.144	5.49	36.62	22.952	9.99	66.62	26.726
11	13.75	2.71	18.09	23.624	5.65	37.67	24.734	10.28	68.52	30.046
12	15.00	2.79	18.59	23.624	5.81	38.72	25.327	10.56	70.43	29.096
13	16.25	2.86	19.09	23.144	5.96	39.76	26.277	10.85	72.33	34.806
14	17.50	2.94	19.59	22.194	6.12	40.81	25.684	11.14	74.24	35.756
15	18.75	3.01	20.10	22.674	6.28	41.86	22.237	11.42	76.14	37.176

ขึ้นรูปรีด 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 22.674 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 22.237 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 37.176 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด

ตารางที่ ก.6 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 2.5 MPa ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะกดพื้นที่ ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลาก ขึ้นรูป (kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลาก ขึ้นรูป (kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรงลาก ขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	6.044	4.08	27.21	4.617	7.42	49.49	2.794
2	2.50	2.03	13.56	27.046	4.24	28.25	21.307	7.71	51.39	34.194
3	3.75	2.11	14.07	24.831	4.39	29.30	21.787	7.99	53.30	36.094
4	5.00	2.19	14.57	25.841	4.55	30.35	22.737	8.28	55.20	35.144
5	6.25	2.26	15.07	26.554	4.71	31.39	23.207	8.57	57.10	33.724
6	7.50	2.34	15.57	22.336	4.87	32.44	24.157	8.85	59.01	35.624
7	8.75	2.41	16.08	22.336	5.02	33.48	24.157	9.14	60.91	34.194
8	10.00	2.49	16.58	23.524	5.18	34.53	26.537	9.42	62.81	35.144
9	11.25	2.56	17.08	24.116	5.34	35.58	26.537	9.71	64.72	35.624
10	12.50	2.64	17.58	23.524	5.49	36.62	28.907	9.99	66.62	35.144
11	13.75	2.71	18.09	25.306	5.65	37.67	28.907	10.28	68.52	35.624
12	15.00	2.79	18.59	25.899	5.81	38.72	27.957	10.56	70.43	35.624
13	16.25	2.86	19.09	26.849	5.96	39.76	27.487	10.85	72.33	35.144
14	17.50	2.94	19.59	26.256	6.12	40.81	28.907	11.14	74.24	34.194
15	18.75	3.01	20.10	22.809	6.28	41.86	29.688	11.42	76.14	34.674

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 22.809 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 29.688 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 34.674 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ ก.7 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 5 MPa ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะ กดพื้นที่ (%)		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	3.585	4.08	27.21	5.566	7.42	49.49	5.740
2	2.50	2.03	13.56	25.015	4.24	28.25	25.516	7.71	51.39	35.740
3	3.75	2.11	14.07	25.015	4.39	29.30	28.886	7.99	53.30	35.260
4	5.00	2.19	14.57	24.535	4.55	30.35	25.556	8.28	55.20	35.740
5	6.25	2.26	15.07	25.495	4.71	31.39	21.756	8.57	57.10	35.260
6	7.50	2.34	15.57	25.495	4.87	32.44	26.036	8.85	59.01	34.310
7	8.75	2.41	16.08	24.065	5.02	33.48	28.886	9.14	60.91	35.260
8	10.00	2.49	16.58	28.815	5.18	34.53	26.986	9.42	62.81	34.780
9	11.25	2.56	17.08	24.065	5.34	35.58	29.356	9.71	64.72	34.310
10	12.50	2.64	17.58	22.635	5.49	36.62	25.556	9.99	66.62	33.830
11	13.75	2.71	18.09	24.535	5.65	37.67	30.786	10.28	68.52	34.780
12	15.00	2.79	18.59	25.965	5.81	38.72	29.356	10.56	70.43	35.740
13	16.25	2.86	19.09	25.965	5.96	39.76	29.356	10.85	72.33	34.780
14	17.50	2.94	19.59	25.965	6.12	40.81	31.256	11.14	74.24	34.310
15	18.75	3.01	20.10	28.815	6.28	41.86	29.356	11.42	76.14	34.780

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 28.815 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 29.356 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 34.780 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ ก.8 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 7.5 MPa ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะ กดพื้นที่ (%)		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	3.572	4.08	27.21	5.221	7.42	49.49	3.528
2	2.50	2.03	13.56	24.714	4.24	28.25	60.951	7.71	51.39	36.382
3	3.75	2.11	14.07	24.964	4.39	29.30	34.341	7.99	53.30	36.474
4	5.00	2.19	14.57	25.572	4.55	30.35	22.931	8.28	55.20	36.952
5	6.25	2.26	15.07	26.057	4.71	31.39	21.981	8.57	57.10	38.566
6	7.50	2.34	15.57	26.427	4.87	32.44	26.731	8.85	59.01	36.856
7	8.75	2.41	16.08	26.679	5.02	33.48	21.981	9.14	60.91	36.572
8	10.00	2.49	16.58	27.164	5.18	34.53	25.311	9.42	62.81	37.330
9	11.25	2.56	17.08	27.177	5.34	35.58	24.831	9.71	64.72	36.096
10	12.50	2.64	17.58	27.072	5.49	36.62	27.211	9.99	66.62	35.524
11	13.75	2.71	18.09	27.204	5.65	37.67	26.261	10.28	68.52	36.094
12	15.00	2.79	18.59	27.927	5.81	38.72	30.541	10.56	70.43	36.474
13	16.25	2.86	19.09	28.057	5.96	39.76	17.541	10.85	72.33	36.380
14	17.50	2.94	19.59	27.837	6.12	40.81	27.211	11.14	74.24	37.140
15	18.75	3.01	20.10	27.967	6.28	41.86	30.541	11.42	76.14	40.276

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 27.967 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 30.541 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 40.276 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ ก.9 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะ กดพื้นชั๊กลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.288	4.08	27.21	3.203	7.42	49.49	2.480
2	2.50	2.03	13.56	7.792	4.24	28.25	17.165	7.71	51.39	31.040
3	3.75	2.11	14.07	15.392	4.39	29.30	16.688	7.99	53.30	22.480
4	5.00	2.19	14.57	15.872	4.55	30.35	16.450	8.28	55.20	22.010
5	6.25	2.26	15.07	15.392	4.71	31.39	16.808	8.57	57.10	22.010
6	7.50	2.34	15.57	15.872	4.87	32.44	16.808	8.85	59.01	22.010
7	8.75	2.41	16.08	14.442	5.02	33.48	17.163	9.14	60.91	30.560
8	10.00	2.49	16.58	15.392	5.18	34.53	17.640	9.42	62.81	22.480
9	11.25	2.56	17.08	15.872	5.34	35.58	17.993	9.71	64.72	23.910
10	12.50	2.64	17.58	15.392	5.49	36.62	17.163	9.99	66.62	27.710
11	13.75	2.71	18.09	16.822	5.65	37.67	17.165	10.28	68.52	37.210
12	15.00	2.79	18.59	15.872	5.81	38.72	17.758	10.56	70.43	38.640
13	16.25	2.86	19.09	14.922	5.96	39.76	17.283	10.85	72.33	38.640
14	17.50	2.94	19.59	14.442	6.12	40.81	17.640	11.14	74.24	39.590
15	18.75	3.01	20.10	14.922	6.28	41.86	16.808	11.42	76.14	34.360

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 14.922 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 16.808 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 34.360 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ ก.10 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 2.5 MPa ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะ กดพื้นชั๊กลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	2.929	4.08	27.21	4.126	7.42	49.49	3.745
2	2.50	2.03	13.56	13.119	4.24	28.25	17.656	7.71	51.39	28.887
3	3.75	2.11	14.07	12.649	4.39	29.30	17.656	7.99	53.30	29.137
4	5.00	2.19	14.57	13.119	4.55	30.35	19.556	8.28	55.20	29.745
5	6.25	2.26	15.07	13.119	4.71	31.39	20.036	8.57	57.10	30.230
6	7.50	2.34	15.57	12.649	4.87	32.44	20.036	8.85	59.01	30.600
7	8.75	2.41	16.08	13.119	5.02	33.48	20.036	9.14	60.91	30.852
8	10.00	2.49	16.58	13.599	5.18	34.53	19.556	9.42	62.81	31.337
9	11.25	2.56	17.08	15.499	5.34	35.58	19.556	9.71	64.72	31.350
10	12.50	2.64	17.58	15.029	5.49	36.62	19.076	9.99	66.62	31.245
11	13.75	2.71	18.09	15.029	5.65	37.67	20.036	10.28	68.52	31.377
12	15.00	2.79	18.59	15.029	5.81	38.72	18.606	10.56	70.43	32.100
13	16.25	2.86	19.09	15.979	5.96	39.76	17.176	10.85	72.33	32.230
14	17.50	2.94	19.59	15.499	6.12	40.81	16.226	11.14	74.24	32.010
15	18.75	3.01	20.10	15.499	6.28	41.86	17.176	11.42	76.14	32.140

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 15.499 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 17.176 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 32.140 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ ก.11 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 5 MPa ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะ กดพื้นชั๊กลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	3.772	4.08	27.21	0.814	7.42	49.49	4.739
2	2.50	2.03	13.56	19.774	4.24	28.25	22.674	7.71	51.39	35.649
3	3.75	2.11	14.07	17.559	4.39	29.30	21.244	7.99	53.30	31.849
4	5.00	2.19	14.57	18.569	4.55	30.35	20.764	8.28	55.20	38.029
5	6.25	2.26	15.07	19.282	4.71	31.39	17.914	8.57	57.10	25.669
6	7.50	2.34	15.57	15.064	4.87	32.44	21.724	8.85	59.01	31.849
7	8.75	2.41	16.08	15.064	5.02	33.48	17.444	9.14	60.91	59.879
8	10.00	2.49	16.58	16.252	5.18	34.53	20.764	9.42	62.81	35.179
9	11.25	2.56	17.08	16.844	5.34	35.58	21.244	9.71	64.72	40.399
10	12.50	2.64	17.58	16.252	5.49	36.62	18.394	9.99	66.62	37.549
11	13.75	2.71	18.09	18.034	5.65	37.67	20.764	10.28	68.52	37.079
12	15.00	2.79	18.59	18.627	5.81	38.72	21.244	10.56	70.43	37.549
13	16.25	2.86	19.09	19.577	5.96	39.76	21.244	10.85	72.33	36.129
14	17.50	2.94	19.59	18.984	6.12	40.81	19.814	11.14	74.24	37.549
15	18.75	3.01	20.10	15.537	6.28	41.86	21.244	11.42	76.14	37.549

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 15.537 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 21.244 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 37.549 kN = แรงลากขึ้นรูป
 ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ ก.12 แรงในการลากขึ้นรูปแบบไฮโดรไดนามิกส์ 7.5 MPa ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะ กดพื้นชั๊กลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec								
		แรงกดขึ้นงาน 1.884 kN			แรงกดขึ้นงาน 3.942 kN			แรงกดขึ้นงาน 7.130 kN		
mm	%	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)	แรงกด ขึ้นงาน (kN)	%	แรง ลากขึ้น รูป(kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.523	4.08	27.21	0.515	7.42	49.49	3.532
2	2.50	2.03	13.56	27.047	4.24	28.25	29.407	7.71	51.39	39.350
3	3.75	2.11	14.07	26.570	4.39	29.30	29.524	7.99	53.30	43.150
4	5.00	2.19	14.57	26.332	4.55	30.35	29.522	8.28	55.20	42.200
5	6.25	2.26	15.07	26.690	4.71	31.39	27.742	8.57	57.10	42.200
6	7.50	2.34	15.57	26.690	4.87	32.44	30.597	8.85	59.01	41.250
7	8.75	2.41	16.08	27.045	5.02	33.48	28.812	9.14	60.91	42.670
8	10.00	2.49	16.58	27.522	5.18	34.53	29.762	9.42	62.81	43.620
9	11.25	2.56	17.08	27.875	5.34	35.58	29.762	9.71	64.72	43.150
10	12.50	2.64	17.58	27.045	5.49	36.62	29.049	9.99	66.62	45.530
11	13.75	2.71	18.09	27.047	5.65	37.67	29.879	10.28	68.52	46.950
12	15.00	2.79	18.59	27.640	5.81	38.72	29.762	10.56	70.43	49.330
13	16.25	2.86	19.09	27.165	5.96	39.76	29.522	10.85	72.33	35.550
14	17.50	2.94	19.59	27.522	6.12	40.81	28.334	11.14	74.24	45.530
15	18.75	3.01	20.10	26.690	6.28	41.86	29.167	11.42	76.14	43.620

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ; $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 26.690 kN = แรงลากขึ้นรูปขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ; 19.62 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 29.167 kN = แรงลากขึ้นรูปขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ และ 35.69 N/mm = ค่าคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 43.620 kN = แรงลากขึ้นรูปขึ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้ เกิดรอยฉีกขาด เนื่องจากแรงดันน้ำมันที่สูงเกินไป

ตารางที่ ก.13 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปอลูมิเนียม AA1100

แรงกดแผ่นชิ้นงาน ด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm ²)	แรงกดพื้นที่จากการ ลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูป ด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ที่แรงดันต่างๆ (kN)		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
9.42	8.092	9.603	10.880	10.987
19.62	11.255	12.043	14.225	14.892
35.69	14.875	16.043	16.892	18.437

ตารางที่ ก.14 แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100

แรงกดแผ่นชิ้นงาน ด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm ²)	แรงกดพื้นที่จากการ ลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูป ด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ที่แรงดันต่างๆ (kN)		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
9.42	22.196	24.218	25.331	26.426
19.62	23.646	26.459	27.614	28.219
35.69	30.688	34.196	34.974	36.710

ตารางที่ ก.15 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801

แรงกดแผ่นชิ้นงาน ด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm ²)	แรงกดพื้นที่จากการ ลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูป ด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ที่แรงดันต่างๆ (kN)		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
9.42	13.874	14.391	16.936	26.597
19.62	16.916	18.501	20.486	28.481
35.69	29.014	30.598	36.443	39.648

ตารางที่ ก.16 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดัน
น้ำมัน 2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm²

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

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.17 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดัน
น้ำมัน 2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm²

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

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.18 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดันน้ำมัน
2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm²

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

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.19 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองแดง C 1100 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดันน้ำมัน 2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm²

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

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.20 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองแดง C 1100 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดันน้ำมัน 2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm²

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

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.21 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองแดง C 1100 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดันน้ำมัน
2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm²

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

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.22 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดันน้ำมัน
2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm²

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

ตารางที่ ก.23 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดันน้ำมัน
2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm²

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

ตารางที่ ก.24 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ด้วยแรงดันน้ำมัน
2.5 MPa-7.5 MPa และค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm²

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

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.25 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		2.990	12.000	29.194	-3.119	11.000	-19.845
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	2.238	14.000	26.443	-2.394	12.000	-14.000
	5.0 MPa	2.340	13.000	27.334	-1.430	16.000	-16.000
	7.5 MPa	3.196	12.000	29.003	-1.294	13.000	-16.000

ตารางที่ ก.26 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		2.211	12.000	29.194	-1.665	11.000	-19.845
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	2.227	14.000	26.443	-1.649	12.000	-14.000
	5.0 MPa	2.239	13.000	27.334	-1.635	16.000	-16.000
	7.5 MPa	2.161	12.000	29.003	-1.880	13.000	-16.000

ตารางที่ ก.27 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		2.218	12.000	29.194	-1.411	11.000	-19.845
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	2.344	14.000	26.443	-1.500	12.000	-14.000
	5.0 MPa	2.253	13.000	27.334	-1.397	16.000	-16.000
	7.5 MPa	2.476	12.000	29.003	-1.608	13.000	-16.000

ตารางที่ ก.28 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		3.439	9.826	27.842	2.747	7.850	-10.039
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	3.483	9.953	30.786	1.985	5.672	-9.284
	5.0 MPa	3.595	10.273	29.408	1.985	5.672	-8.933
	7.5 MPa	3.478	9.936	32.608	2.150	6.143	-7.333

ตารางที่ ก.29 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		4.508	12.879	29.408	2.072	5.921	-8.933
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	3.478	9.936	29.408	2.150	6.143	-8.933
	5.0 MPa	4.436	12.673	30.786	1.976	5.646	-9.284
	7.5 MPa	3.772	10.778	29.543	2.077	5.934	-9.575

ตารางที่ ก.30 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		11.278	22.000	30.786	6.401	12.000	-9.284
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	11.997	23.000	32.608	6.689	14.000	-8.333
	5.0 MPa	12.140	22.000	32.608	5.510	13.900	-8.633
	7.5 MPa	11.935	23.400	33.809	7.001	13.600	-12.884

ตารางที่ ก.31 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 1.884 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		3.1056	10.7000	42.0168	-4.0176	9.8000	-10.5168
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	4.5976	11.7000	44.9584	-6.0448	7.8000	-11.1696
	5.0 MPa	6.8288	12.6200	41.5640	-4.4696	10.7800	-12.0320
	7.5 MPa	4.5024	13.8670	42.5400	-6.1720	9.6690	-9.3640

ตารางที่ ก.32 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 3.942 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		3.4448	22.0000	44.8080	3.7680	18.0000	-11.5520
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	4.1240	21.5000	42.3280	5.2880	17.0000	-9.1280
	5.0 MPa	4.3000	19.0000	42.0880	5.5000	18.0000	-9.9024
	7.5 MPa	5.3496	17.0000	42.2040	3.3312	18.0000	-11.5320

ตารางที่ ก.33 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 7.130 kN

กระบวนกรขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว	กลางถั่ว	ขอบถั่ว	ผนังถั่ว
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		8.998	25.000	42.844	6.444	26.000	-7.792
กระบวนกร HDD	2.5 MPa	8.234	24.000	42.524	8.575	26.000	-12.492
	5.0 MPa	7.092	23.000	42.844	8.932	26.000	-12.872

ภาคผนวก ข

ข้อมูลวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง





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

รายงานผลการทดสอบ		หน้า 1/3
หมายเลขปฏิบัติการ	5503020940	
ชื่อที่อยู่ของผู้ขอรับบริการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110	
รายละเอียดตัวอย่าง	- เหล็กแผ่น SPCC จำนวน 1 ตัวอย่าง - สปริงแม่พิมพ์ (สีแดง, สีฟ้า, สีเหลือง) จำนวน 3 ตัวอย่าง	
หมายเลขตัวอย่าง	-	
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	สภาพเรียบร้อย	
วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง	30 มีนาคม 2555	
วันเดือนปีที่ทดสอบ	4 ถึง 5 เมษายน 2555	
วิธีทดสอบ	- ทดสอบค่าคงที่ของสปริง ด้วยเครื่อง Auto Graph (AG-IS100 kN) - ทดสอบส่วนประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer	
ผลการทดสอบ	ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในหน้าถัดไป	
ผู้ทบทวน	ผู้รับรอง	
(นายจักรกฤษ รุ่งเรือง) ทีมวิชาการ 10 / 04 / 9555	(นายอุทัย อุนะกุล) ผู้จัดการแผนกทดสอบ 18 / 4 / 55	
ผู้ทดสอบ นายกริธา ศรีลาศักดิ์		sp

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วน 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
 F (DTD) – TR – 02 (Rev.01)

ผลการทดสอบ

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



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

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดลอกรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันยานยนต์
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

หมายเลขปฏิบัติการ 5503020940

หน้า 3/3

ผลการทดสอบ

ส่วนประกอบทางเคมี

รายการทดสอบ		หน่วย	ผลการทดสอบ			
			#1	#2	#3	Uncertainty (95 %,k=2)
ส่วนประกอบทางเคมี	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			
	โบลิปลินัม		0.0027			
	ทิตานียม		0.0002			
	นิกเกิล + โครเมียม		-			

ผู้ทดสอบ *[Signature]* 10/04/2555

ผู้ทบทวน *[Signature]* 10/04/2555

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น 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



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 oC	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



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 :

(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



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

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

CERTIFICATE OF ANALYSIS

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

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

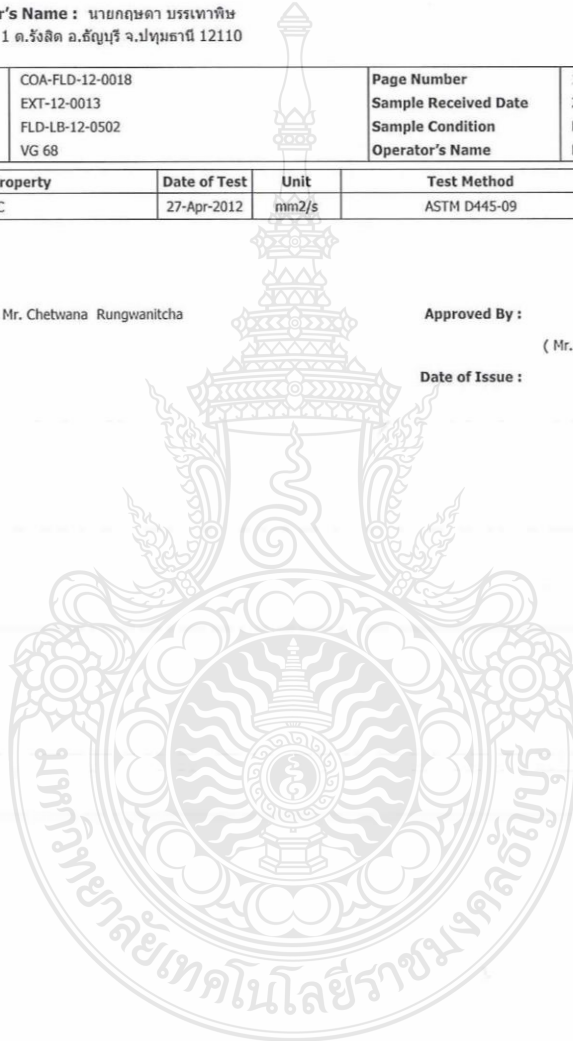
Item	Property	Date of Test	Unit	Test Method	Result
1.	Viscosity at 40 oC	27-Apr-2012	mm ² /s	ASTM D445-09	52.81

Remark :

Reported By : Mr. Chetwana Rungwanittha

Approved By : 
 (Mr. Wichian Tantithumposit)

Date of Issue : 27-Apr-2012

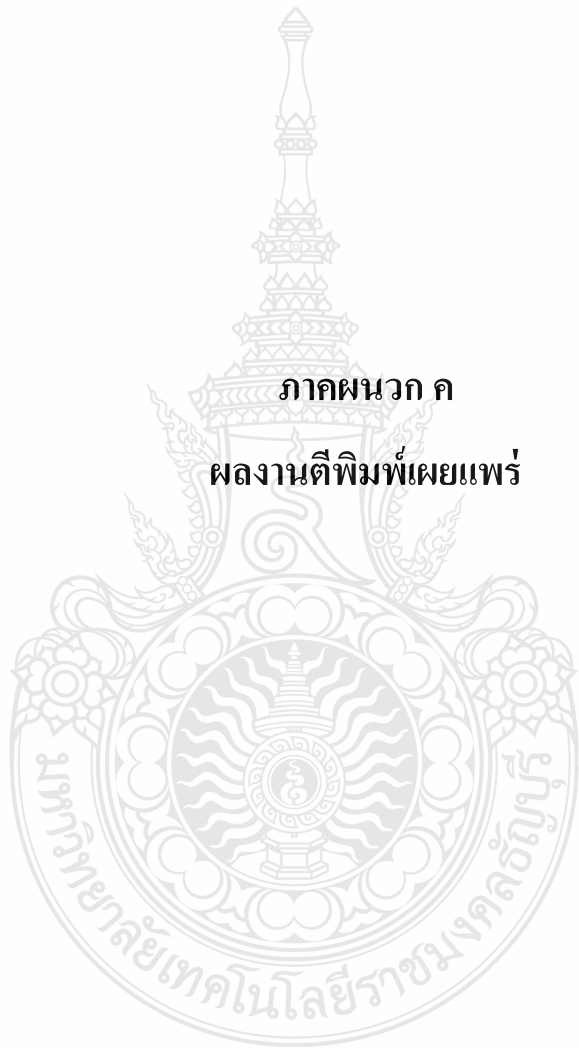


This certificate of analysis is referred to only submitted sample(s). It is your responsibility to use herein results in any purposes.
 This certificate shall not be reproduced, except in full, and herein results shall not be used for advertising or public relation without
 the written approval of the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

FR-RTI-SP-023-001

Revision 3 10/05/53

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
 ขอเรียนเชิญเข้าร่วมการสัมมนา

IE Network Conference 2012

การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555
 17 - 19 ตุลาคม 2555 ณ โรงแรมเมธาวลัย รัชอำ อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี

สาขาวิชาในการประชุม

1. Operations Research
2. Production and Operation Management
3. Work Study, Plant Layout, Safety Engineering and Ergonomics
4. Quality Management and Statistical Applications
5. Energy and Environmental Management
6. Materials, Production, and Manufacturing Engineering
7. Logistics and Supply Chain Management
8. Innovation Management and Industrial Technology Transfer
9. Maintenance Management
10. Engineering Economy and Cost Management
11. Others that Related to Industrial Engineering
12. Special Topic: ASEAN Economic Community



กำหนดการสำคัญ

เปิดรับบทคัดย่อ	14 ก.พ. - 30 เม.ย. 55
ประกาศผลพิจารณาบทคัดย่อ	14 พ.ค. 55
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์	30 มิ.ย. 55
ประกาศผลพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์	31 ก.ค. 55
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับแก้ไข	31 ส.ค. 55
การลงทะเบียนล่วงหน้า	1 ก.ค. - 31 ส.ค. 55
ประชุมวิชาการ	17-19 ต.ค. 55

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 SRIPATUM
 สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติม
 ผศ.ดร.สุทัศน์ตรา เกษราพงษ์, ผศ.วาริตต์ มณีศรี
 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 โทรศัพท์: 0-2579-1111x1355 และ x2177 โทรสาร: 0-2579-1111x2147
 เว็บไซต์: <http://ienetwork2012.spu.ac.th> อีเมล: ienetwork2012@spu.ac.th

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการข่า่งงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูดีมา

รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คาริษา สุธีวงศ์.

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสวงค์ โอสถศิลป์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ เรียวเคชะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์ไพลาศ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ

อาจารย์สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวศ สุธีจารุวัฒน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริง ปรีชานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ อัครประภมพงศ์

อาจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย

อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล

อาจารย์ภูมิ เหลืองจามิกร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาจารย์ ดร.ปุ่นเต็ม สัจจมงคล

อาจารย์ ดร.พัชรี โตแก้ว ทองรัตน์ะ

อาจารย์ ดร.รมิตายุ อยู่สุข

อาจารย์ ดร.สุภาวรัตน์ วงศ์วีระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล

อาจารย์ ดร.ไอลดา ตวีรัตน์ตระกูล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

อาจารย์อดเจ ชัยมณี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

อาจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง

อาจารย์ ดร.นฤชวิภา จันทศิริ

อาจารย์ ดร.เพ็ญสุตา พันธุฤทธิ์คำ

อาจารย์นันทวุฒิ ศรีอริยวัฒน์

อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ หมั่นนงนิชกุล

อาจารย์ ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

อาจารย์ฉัตรินนทร์ กลั่นนงิน

อาจารย์ประภาพรพรณ เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาอุณเรงค์ สายแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ เศรษฐ์สมบุรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.คณิพงษ์ แซ่หวู่โชติศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินทร์ สุขโต

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนัท กฤตวรกาญจน์
รองศาสตราจารย์ ดร.นิเวศ เจริญใจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งนทร ชมภูอินทร์
อาจารย์ ดร.วรรณ เสงีรัฐ

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภานคง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤต เล็กสกุล
อาจารย์ ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ ทิพย์วงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โธมพัตรภรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โยธา คำคำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พจนาน เตียววัฒนรัฐศักดิ์
อาจารย์ ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์
อาจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข
อาจารย์ ดร.พิเชษฐ ศรีโยธา
อาจารย์มงคล สันเววัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.อาษา ประทีปเสน
รองศาสตราจารย์วชิระ มีทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุบัตนต์ พรหมบุญพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวันทนา อุดมศักดิ์กุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุเนทรวาณิชชัย
อาจารย์ ดร.ไพฑูริย์ ช่างทอง
อาจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ บุญเที่ยง
อาจารย์ ดร.อุษณีย์ คำพูด
อาจารย์เจษฎา จันทวงษ์โต
อาจารย์สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร เก่งพล
รองศาสตราจารย์วันชัย แดดมเหล็กสกุล
อาจารย์ ดร.ภนภพร ศรีปฐมสวัสดิ์
อาจารย์ ดร.กฤษดา อัครรุ่งนสกุล
อาจารย์ ดร.กฤษ วัฒนาพันธ์ศรี
อาจารย์ ดร.ชยชัย เหล็กคามัญญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นราธิป แสงชัย
อาจารย์ ดร.ธเนศกร อินทรกำจรชัย
อาจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิต
อาจารย์ ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์
อาจารย์สงกรานต์ บำรุงศรีณิพย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

อาจารย์ ดร.วิจิตรพลศักดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ ออยุธยา
อาจารย์ธนา สุนาวิกษ์
อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงหัตถวิวัฒนา

อาจารย์วิรินทร์ เกียรติสกุล
อาจารย์อรดิษา อเน็จชาญชัย
อาจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทิรมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่างพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์นเรียร
อาจารย์ ดร.ชัยยะ ปราวดีพลกรัง
อาจารย์ศุภเอก ประมูลมาก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ศรีวัฒนพงษ์
อาจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อารีพันธ์
อาจารย์ ดร.นเรศ อินตริวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา
อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารูภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อารีพันธ์
อาจารย์ ดร.นเรศ อินตริวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา
อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารูภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมื่อนขาว
อาจารย์ ดร.มาตมะสุโสมิ มะแซ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อาจารย์สัญญา คำจรัส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล
อาจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริวิกรม์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ เสริมสุขธีอนุวัฒน์
อาจารย์ ดร.ปภากร ทิพย์ชวาล
อาจารย์ ดร.วีระชัย มโนพิเชษฐวัฒนา

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ วีระวาฬฤกษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีศ เหล่าศิริพงษ์ทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสนองจิตร ทอมรสกุลนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรศิริพงษ์ เจริญภัคไพรักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุศคามระ

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล
อาจารย์ ดร.ณัฐพัชร์ อารีวิชกุลกานต์
อาจารย์ ดร.ลัดเมธ วัชรวิบูลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวิชชัย วรรดิโน
อาจารย์ ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

รองศาสตราจารย์ ดร.กวีณ สอนิเพิ่มพูน
อาจารย์ ดร.ขวัญณิณี คำเมือง
อาจารย์วิลาศ เช่าสกุล

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

มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์หา นาควชิระกุล
อาจารย์ ดร.จักรวาล คุณะศิลป์
อาจารย์ ดร.อุภูวีย์ จันทร์ลา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรพลาญ ลีลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวิวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ
อาจารย์ ดร.ภุชงค์ ประสพชัยชนะ

มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

รองศาสตราจารย์สุคนธ์ อาจฤทธิ์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาวรรณ อัศวไพบูลย์
อาจารย์ ดร.พิษณุ มณีสมบัติ
อาจารย์พรรคพงษ์ แก่นถาวรศักดิ์
อาจารย์สมพร พรหมดวง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพียงจันทร์ จรุงจิตร
อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไพบ
อาจารย์ศิลป์ชัย วัฒนเสถ
อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภุชงค์ พิศลยบุตร
อาจารย์ ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์
อาจารย์นกุล อุบลมาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชนิ ภูวพัฒนพันธ์
อาจารย์นันทวรรณ อ้าเอี่ยม
อาจารย์มารีสา แก้วสุวรรณ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ธนวัฒน์ แก้วพัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิลวรรณ อุ่มฤทธิ์
อาจารย์ ดร.พิศดา ทวีพานิช
อาจารย์พงษ์เทัญ จันทนะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มิตรมาณี ศรีวิพัฒนางศ์
อาจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
อาจารย์สิริเศษ อาตินิยม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
รองศาสตราจารย์สมชาย อูโสม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ วัฒนวิไล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญชนา สิงหวาดัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจวิญ เจตวิจิตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิเชษฐ ตระการชัยศิริ

รองศาสตราจารย์วินิตา วัฒนเมธี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภคางค์เอน โฆษณา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนกิศพร มีมงคล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพพรรณ ไชยประสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ สังข์พงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อศศวง พันธุ์ธรา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดวงน ตั้งโพธิธรรม

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชณะ เบียงกมลสิงห์
อาจารย์ ดร.วิพนชัย พฤกานนท์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อาจารย์จิตตดา ชิมแจวิญ
อาจารย์นิศากร สมสุข

อาจารย์วรศักดิ์ เทตียรังตฤกษ์
อาจารย์อรอุมา กอศนาน

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศนิศร ภูนิคม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชธรา เกียรติกรกฎ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิศาณะโต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชฌัญญา ติ
อาจารย์ ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์
อาจารย์ ดร.ธารุศา พันธุ์นิกุล
อาจารย์ไพ แสงเทียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เทียบทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เกียรติกรกฎ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุริยา ไชยสวัสดิ์
อาจารย์ ดร.ดิศณ์ โสพาพิริยกุล
อาจารย์ศุภวันฉาย โพธิ์หอม
อาจารย์ศุภเชษฐ์ ก้อนจันทร์

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสนา พวงดาวเรือง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี

โรงเรียนนายเรืออากาศ

รองศาสตราจารย์สุทธิ ศรีบูรพา

อาจารย์อวยชัย วิชาต์เอื้อ

อาจารย์อมฤต ศรีบูรพา

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพฤกษ์ อภาภเวศ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์

อาจารย์เจษฎา วงษ์อ่อน

อาจารย์ทิพย์ ทนวัน

อาจารย์สุนทร มุสทา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ภรรณชัย กัดยาศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาตุจันทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ ศตวงบุญจิต

อาจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย

อาจารย์ ดร.วิภา ศรีสืบสาน

อาจารย์ ดร.อุคม จันทรวัดสุข

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ ก่อมจิตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ อรุณรัตน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย สีดาวิวงศ์

อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหลิม

อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

อาจารย์ ดร.ณยศ พลอยคน้อย

อาจารย์กวีนธร สัยเจริญ

มหาวิทยาลัยมหิดล

รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์

อาจารย์ ดร.ภนภรรณ กิ่งผคง

อาจารย์ ดร.มงคล เทียนวิบูลย์

อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

อาจารย์ ดร.ธวัช ศิริโรจนกุล

อาจารย์ดวงยศ ลูกิกิตย์

อาจารย์ศุภชัย ราชภูริศิริ

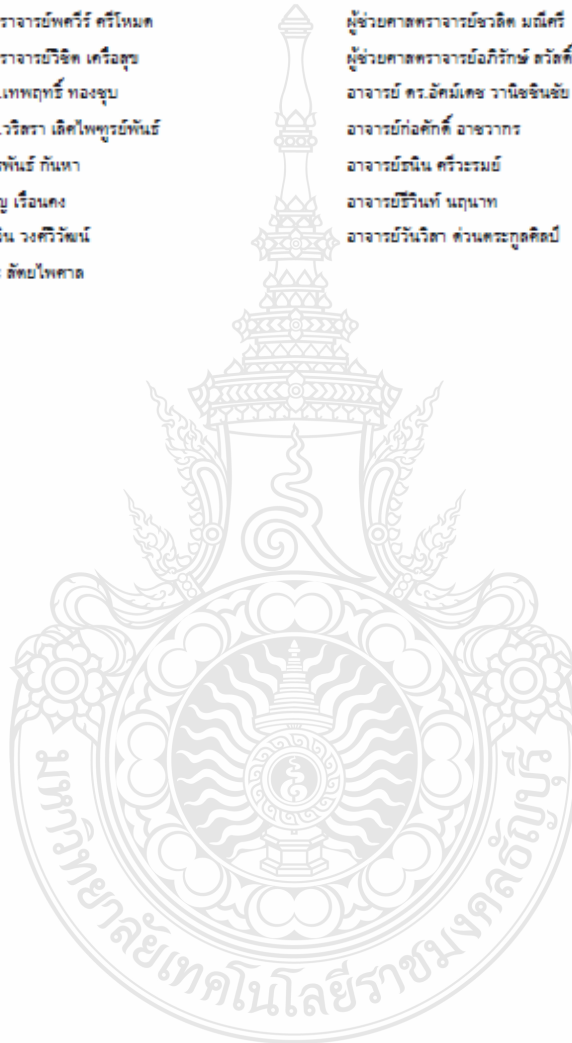
อาจารย์ธนา สาคทา

อาจารย์สิทธิพันธุ์ ตันทวีรุฬห์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ ชะยะกุลศิริ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัช มณีศรี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ ทัดนุกัณฑ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาภัทร พรหมวัฒน์นุกัณฑ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัศวีร์ ศรีใหม่ศ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช เศรีอสุข
 อาจารย์ ดร.เทพฤทธิ์ ทองอุบล
 อาจารย์ ดร.วิธรา เลิศไพฑูรย์พันธ์
 อาจารย์จิกรพันธ์ กันทา
 อาจารย์ธัญญา เรือนคง
 อาจารย์อัศรินทร์ วงศ์วิวัฒน์
 อาจารย์ศิระ ลัดยไพศาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชดชิต เอี่ยมวรภูมิกุล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา เกษราพงศ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ถาวร อมตกิตต์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนแพงค์ อธิสิทธิ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ
 อาจารย์ ดร.อัคมเดช วานิชอินชัย
 อาจารย์ก้องศักดิ์ อชากร
 อาจารย์ธเนศ ศรีระมย์
 อาจารย์ธีรินทร์ นฤนาท
 อาจารย์วันวิสา คำนะตระกูลศิลป์



กลุ่มที่ 6 Materials, Production, and Manufacturing Engineering (ต่อ)

MPM031	การประยุกต์การเชื่อมมิกในการต่อชนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ศักดิ์ชัย จันทศรี* สุรัตน์ ตรียวนพงศ์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ สุวัฒน์ ภูเกา	1313
MPM032	คุณภาพงานเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าปิวาไนซ์กับอลูมิเนียม เกรด 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ณัฐกฤต แสงสว่าง* จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์	1319
MPM033	การเปรียบเทียบความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางระหว่างการอบชุบและการเชื่อมพอกผิวสำหรับงานต้านทานการเสียดสี สุขอังคณา ลี* ไชกุล วิริยาธนะนาโชติ วัชรินทร์ ธีระบุตร จุฑารัตน์ สมสุข เบญจมาศ เบญจจรรยา	1331
MPM034	การศึกษาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ที่ผ่านกระบวนการกึ่งของแข็งและกระบวนการทางความร้อน T6 นพพล เหลืองอักษร นฤมล ปลื้มจิตต์ นภิสพร มีมงคล*	1337
MPM035	การพัฒนาสมบัติพอลิแลคติกแอซิดเพื่อการผลิตเป็นฟิล์มแบบยืดหยุ่น กุลวดี สังข์สนธิ	1344
MPM036	การศึกษาพฤติกรรมการต้านทานการสึกหรอแบบยึดเกาะของพันธะในงานแม่พิมพ์ตัด ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ* ประสาน แสงเขียว	1356
MPM037	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นงานขึ้นความหนาสูงในงานแม่พิมพ์ตัด ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ* เฉลิมพล คล้ายนิล	1363
MPM038	อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ธัญญพัฒน์ เจียรละม่อม* ศิริชัย ต่อสกุล	1369
MPM039	การศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมต่อโลหะผสมโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน วิเชียร เกื้อนเครือวัลย์ ภูณทล ทองศรี ศิริชัย ต่อสกุล*	1375
MPM040	การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากกากมะพร้าวเป็นพลังงานทดแทน ศิริชัย ต่อสกุล* ภูณทล ทองศรี จงกล สุภารัตน์	1381

อิทธิพลในการลากชิ้นรูปรีโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์

Influence of Non Ferrous in Hydro Dynamics Deep Drawing Process

ชญญพัฒน์ เจียรละม่อม¹ ศิริชัย ต่อสกุล²

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี

จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: j.thanyapat@hotmail.com

Thanyapat Jianlamom¹ Sirichai Torsakul²

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of technology,

Thanyaburi Pathumthani 12110

E-mail: j.thanyapat@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบจากอิทธิพลของการลากชิ้นรูปรีของโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ชิ้นงานเป็นรูปถ้วยทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มม. แบบมีปีก ขนาด 5 มม. สูง 15 มม. ในอัตราส่วนการลากชิ้นรูป (Drawing Ratio:DR) เท่ากับ 1.8 วัสดุชิ้นงานเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3 ชนิดคือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และอลูมิเนียม เกรด AA1100 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน (Blank holder force) ใช้แรงจากการกดของสปริงแม่พิมพ์ ที่มีค่าคงที่สปริงเท่ากับ 9.42, 19.62, 35.69 N/mm (L=125 mm, D = 27 mm) ตามมาตรฐาน JIS B 5012 และแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิกภายในแม่พิมพ์ที่ 25, 50 และ 75 บาร์ ผลการศึกษาพบว่าแรงกดแผ่นชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับการลากชิ้นรูปวัสดุทั้ง 3 ชนิดคือ 19.62 N/mm และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการลากชิ้นรูปรีแบบปกติ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานน้อยที่สุดสำหรับอลูมิเนียมคือ 6.75 เปอร์เซ็นต์ ทองแดง 5.05 เปอร์เซ็นต์ และทองเหลือง 4.25 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก การลากชิ้นรูปรีไฮโดรไดนามิกส์ อัตราส่วนการลากชิ้นรูป แรงกดแผ่นชิ้นงาน,

Abstract

The purpose of this research was to study the effect of hydrodynamics deep drawing process in non-ferrous alloys. A cylindrical cup specimens of 45 mm in diameter with flange 5 mm and 15 mm in depth (Drawing Ratio: DR) equaled to 1.8 , Materials were composed of three types of non ferrous alloys. Copper C1100 Brass C2801 and Aluminum AA1100 0.5 mm in thickness. Blank holder force derived by pressure of the spring force of the pressing mold. The spring constant of 9.42, 19.62, 35.69 N / mm (L = 125 mm, D = 27 mm) according to JIS B 5012 Coild helical spring for press dies and pressure of hydraulic oil in Chamber at 25,50 and 75 Bar. The study results showed that the appropriate Blank holder force for deep drawing with the three types of materials was 19.62 N / mm Moreover, In comparison to the conventional deep drawing, It was found that the least change of percentage in thickness of working piece walls for aluminum was 6.75 percent Copper was 5.05 percent and brass was 4.25 percent, respectively.

Keywords: Hydrodynamics Deep Drawing, Drawing Ratio, Blank Holder Force

1. บทนำ

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) คือ กระบวนการขึ้นรูปซึ่งใช้ของเหลวเป็นสื่อความดัน (medium pressure) โดยแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปเกิดจากการปิดกั้นของเหลว ดังนั้นลักษณะเด่นของกระบวนการนี้ คือ สามารถขึ้นรูปโลหะที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยใช้จำนวนแม่พิมพ์ และขั้นตอนการขึ้นรูปน้อยกว่าการลากขึ้นรูปทั่วไป เนื่องจากมีของเหลวเป็นตัวกลางในการรับและถ่ายเทแรงอัดซึ่งเป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีความสำคัญในปัจจุบัน และใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์, เครื่องใช้ภายในครัวเรือน, อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนของเครื่องบิน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ในการวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีความสามารถในการลากขึ้นรูปได้ต่ำ (low formability) 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ซึ่งจะทำการลากขึ้นรูปลึกได้ยากโดยทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการ ลากขึ้นรูปลึกด้วยของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) เปรียบเทียบกับกระบวนการลากขึ้นรูปลึกทั่วไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)

ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดाय(Die) พันช์(Punch) และ ตัวกดแผ่นขึ้นงาน(blank holder ring)

2.1.1 แรงในการลากขึ้นรูป

แรงกระทำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ ลากขึ้นรูปลึก ซึ่งเกิดจากแม่พิมพ์ตัวกดหรือพันช์กระทำต่อชิ้นงาน ในรูปที่ 1 แรงกดพันช์ในการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกของกระบวนการลากขึ้นรูปลึก และการคำนวณแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1

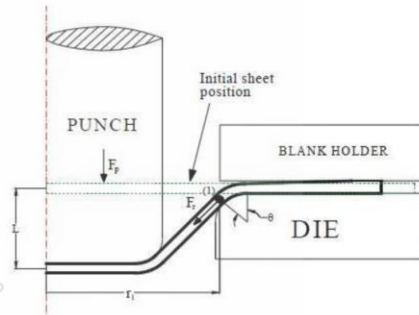
$$F_{dr} = d \times \pi \times s \times R_m \times n \quad (1)$$

โดย n คือ ค่าการปรับค่า (correction value) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการขึ้นรูปจริง ดังแสดงค่าของ n

ในตารางที่ 1 โดยกำหนดค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$ [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



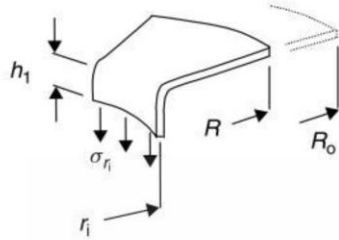
รูปที่ 1 แรงกดพันช์ในการขึ้นรูปด้วย

2.1.2 ความเครียดเชิงตัว

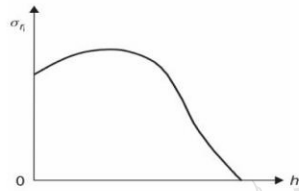
ความเค้นที่เกิดขึ้น บนส่วนของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น จะเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่รัศมีวงนอกของวัสดุแผ่นจะลดลง เนื่องจากโลหะแผ่นจะถูกกดลงไปยังด้านในของดวย รัศมีวงนอก R จะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2 ค่าความเครียดเชิงตัว ซึ่งเกิดจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งวัสดุแผ่นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ถ้าสมมุติให้ค่าความเค้น ที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น เป็นความเค้นเฉลี่ย $(\sigma_r)_{av}$ และไม่คำนึงถึงความหนาที่ไม่เสมอกันของวัสดุแผ่น จะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2 [3]

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

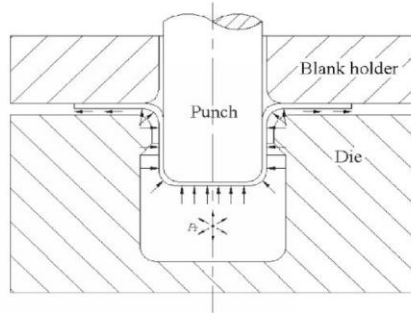
ค่าตัวแปรสองตัวแปร คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้น จนกระทั่งวัสดุเกิดความเครียดเชิงตัว และการลดลงของรัศมี R สามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 3 ซึ่งโดยปกติแล้วความเค้นในขณะการลากขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นในช่วงต้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุดและจะลดลง



รูปที่ 2 ในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปในสภาวะที่ปราศจากแรงเสียดทานความเค้นจะมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด



รูปที่ 3 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่ของพื้นที่



รูปที่ 4 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

โดยที่ P_s คือ แรงดันของเหลวภายในห้องแม่พิมพ์ f_d คือ แรงในการลากขึ้นรูปที่ทำต่อแผ่นเหล็ก และ f_p คือ แรงกดของพื้นที่ในขณะขึ้นรูป

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

2.4 แอนไอโซทรอปของวัสดุโลหะแผ่น (Anisotropy)

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

2.2 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

การลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวในรูปที่ 4 การทำงานและส่วนประกอบของระบบการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1.ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (deep drawing die sets) และ 2.ระบบไฮดรอลิก (hydraulic system) ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของชุดควบคุมไฮดรอลิก และชุดควบคุมอัตโนมัติ การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการลากขึ้นรูปลึก โดยใช้การเคลื่อนที่ของของเหลว นั้น ของเหลวที่มีแรงดันตามการควบคุมจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และไหลออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วสูง จากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันของเหลว นั้น เกิดขึ้นจากการกดของพื้นที่ในจังหวะของการลากขึ้นรูปลึก [4]

2.3 แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อแผ่นขึ้นทดสอบ

ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวในสภาวะของแรงสูง คำนวณได้ตามสมการที่ 3[6]

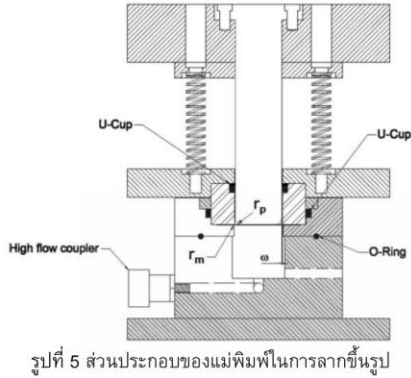
3. การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1 เครื่องบีมและแม่พิมพ์การลากขึ้นรูปลึก

เครื่องบีมอัตราระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตันติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกทำจากวัสดุ SKD11 ชูบแข็ง 58-60 ใช้สปริงเป็นอุปกรณ์กดแผ่นทดสอบ ค่าคงที่สปริง 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร ติดตั้งทั้งหมด 8 ตัว รวมแรงกดขึ้นทดสอบรวม 156.96 นิวตันมิลลิเมตร

ตารางที่ 2 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองลากขึ้นรูปลึก

รัศมีมุมดาวยัน	รัศมีมุมพื้นที่	เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่	ช่องว่างแม่พิมพ์
2 mm	4.5 mm	45 mm	0.65 mm



ตารางที่ 4 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ

สัญลักษณ์	การใช้งาน	ส่วนประกอบทางเคมี(%)			
Aluminum	ทั่วไป	Al	Mn	Si+Fe	Zn
AA1100		99.0	<0.05 Max,	0.95 Max,	<0.10 Max,
Copper	ทั่วไป	Cu			
C1100		99.90			
Brass	ทั่วไป	Cu	Pb	Fe	Zn
C2801		59.0	0.10 Max,	0.07 Max,	39.7

3.2 ระบบต้นกำลังไฮดรอลิก

ชุดต้นกำลังและชุดควบคุมระบบไฮดรอลิก แรงดันสูงสุด 700 บาร์ชุดควบคุมแรงดันเป็นแบบสกรูหมุนสำหรับปรับตั้งแรงดัน ใช้น้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐานเกรด 68 ตามมาตรฐาน มอก.977-2551[8] ค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์ 61.2-75.8 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที เป็นของเหลวที่ใช้เป็นสื่อในการทดลอง



รูปที่ 6 ชุดปรับแรงดันและอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน

ตารางที่ 3 สมบัติของน้ำมันไฮดรอลิก เกรด 68

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

3.3 ชิ้นงานในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ทำชิ้นทดสอบเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร กัดเป็นแผ่นวงกลมด้วยเครื่องกัด CNC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร โดยก่อนการนำไปใช้ในการทดลอง ได้ทำการลบคมตัดของแผ่นทดสอบ ทั้ง 3 ชนิด

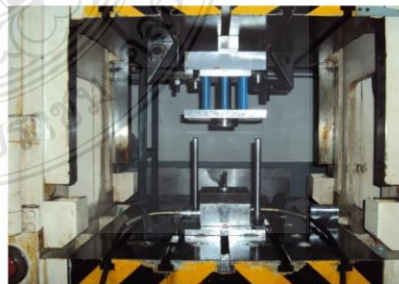
4. วิธีการทดลอง

4.1 ติดตั้งแม่พิมพ์และระบบไฮดรอลิก

ติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน โดยใช้ชุดแคลมป์ยึดแม่พิมพ์เข้ากับสลอตของแม่พิมพ์กับสลอตของฐานเครื่องบีบ พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณหลังจากนั้นติดตั้งระบบควบคุมไฮดรอลิกเข้ากับแม่พิมพ์ โดยใช้สายท่อทางเดินน้ำมันและหัวต่อชนิดรับแรงดันสูง

4.2 สปริงสำหรับแรงกดขึ้นทดสอบ

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจะมีระยะกีดกันพื้นที่สัมผัสชิ้นงานทดสอบ 25 มิลลิเมตร สปริงที่ใช้มีค่าคงที่ตามมาตรฐาน JIS B 5012: 2008 [refer] ขนาดความยาว 125 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 13.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 27 มิลลิเมตร ค่าคงที่สปริง 19.2 นิวตันต่อมิลลิเมตร จำนวน 8 ตัวแรงกดรวมเท่ากับ 3.92 กิโลนิวตัน



รูปที่ 7 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องบีบอัดเรียบร้อยแล้ว

4.3 การควบคุมความดันภายในห้องแม่พิมพ์

การปรับค่าความดันภายในห้องแม่พิมพ์ เพื่อควบคุมความดันของเหลว ให้ได้ตามค่าการทดลองที่ 25, 50 และ 75 Bar โดยปรับที่ชุดต้นกำลังไฮดรอลิกพร้อมตัวปรับแรงดันชนิดสกรูหมุนทำการปรับสกรูควบคุมความดันด้านทางเข้าและทางออกของแม่พิมพ์

4.4 การทดลองลากขึ้นรูป

ทำการทดลองลากขึ้นรูปสีก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และ ทองเหลือง C2801 เป็นรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก 45 มิลลิเมตร ความสูงรวม 15 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างของปีก 5 มิลลิเมตร โดยเริ่มการทดลองที่แรงดัน 25, 50 และ 75 Bar เปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปสีกแบบไม่ใช้แรงดันของเหลว

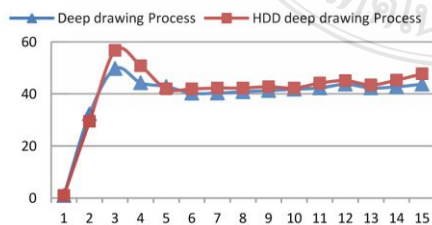
ตารางที่ 5 ตัวแปรการทดลอง

แรงกด (N/mm)	ตัวแปรการทดลอง			
	ลากขึ้นรูปสีกแบบปกติ	แรงดันน้ำมัน (Bar)		
19.62		25	50	75

5. ผลการทดลอง

5.1 แรงกดพื้นที่โดยรวมในการลากขึ้นรูป

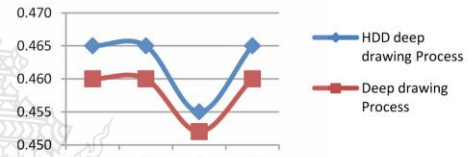
ผลการทดลองพบว่าแรงดันของเหลวภายในมีผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปในสภาวะปกติ และอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกดของพื้นที่ ในการลากขึ้นรูป (fp) การลากขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 75 บาร์ ไม่สามารถขึ้นรูปอลูมิเนียม และทองแดง ได้สำเร็จ เนื่องจากแรงดันของเหลวที่สูงมาก จนทำให้เกิดจากจึกขาดของชิ้นงานอย่างรุนแรง ซึ่งสภาวะดังกล่าวสอดคล้องกับบทความวิจัยของ Lihui Lang ในปี ค.ศ. 2003[6]



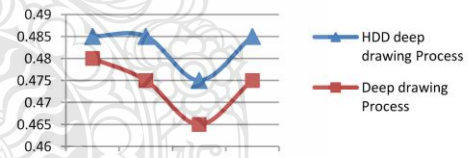
รูปที่ 8 แรงกดการลากขึ้นรูปตามระยะเคลื่อนที่ของพื้นที่

5.2 ความหนาของชิ้นงานหลังขึ้นรูป

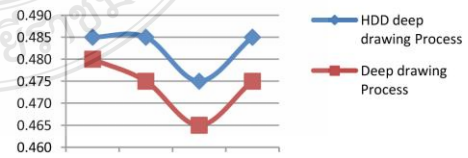
การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ความหนาของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปสีก กับความหนาเดิมของชิ้นงานในการทดสอบ [9] โดยการใช้ไมโครมิเตอร์ชนิดวัดเป็นจุด (point micrometer) วัดที่จุดซึ่งชิ้นงานในการทดสอบถูกแรงกดพื้นที่กระทำ [10] ผลการทดลองความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป พบว่าที่ตำแหน่งการวัดที่ 3 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนามากที่สุด ในทุกสภาวะของการทดลอง เนื่องมาจากเป็นตำแหน่งของผนังด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุด



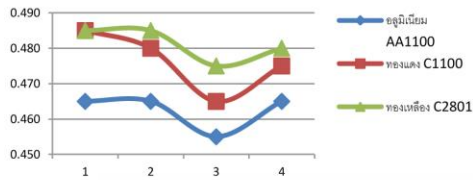
รูปที่ 9 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงาน อลูมิเนียม AA1100 ที่ลากขึ้นรูปสีกด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ กับกระบวนการลากขึ้นรูปสีกโดยทั่วไป



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงาน ทองแดง C1100 ที่ลากขึ้นรูปสีกด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ กับกระบวนการลากขึ้นรูปสีกโดยทั่วไป



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงาน ทองเหลือง C2801 ที่ลากขึ้นรูปสีกด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ กับกระบวนการลากขึ้นรูปสีกโดยทั่วไป



รูปที่ 12 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงาน ที่ทำจากโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 3 ชนิดที่ลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ กับกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยทั่วไป

6. สรุปผลการทดลอง

การลากขึ้นรูปลึกโดยใช้ของเหลวเปรียบเทียบกับ การลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ แรงดันของเหลวส่งผลทำให้ แรงกดพื้นที่โดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยที่การขึ้นรูปโดยใช้ แรงดันของเหลว 50 บาร์ เกิดแรงกดพื้นที่สูงสุดเท่ากับ 56.75 กิโลนิวตัน แรงดันของเหลว เป็นแรงต้านทานแรง กดของพื้นที่ในขณะทำการขึ้นรูป เมื่อแรงดันของเหลว เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้แรงต้านทานแรงกดของพื้นที่สูงขึ้น ด้วย ซึ่งแรงต้านดังกล่าว มีผลทำให้แรงกดพื้นที่กระทำ โดยตรงต่อแผ่นทดลองลดลง โดยในสภาวะของการลาก ขึ้นรูปลึกด้วยแรงดันของเหลว 50 บาร์ เกิดแรงกดพื้นที่ที่ กระทำต่อชิ้นงานการทดลองต่ำที่สุด เท่ากับ 56.89 กิโล นิวตัน ซึ่งเป็นสภาวะการลากขึ้นรูปลึกที่ดีที่สุดสำหรับ ทองแดงและทองเหลือง ส่วนชิ้นงานอลูมิเนียมนั้นจะไม่ พบรอยแตกที่ผิว ที่แรงดัน 25 บาร์ แต่ไม่สามารถขึ้นรูป เป็นทรงรูปถ้วยได้เนื่องจากแรงกดของสปริงที่ทำการ ทดลองมากเกินไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการแนะนำ แนวทางการดำเนินงานวิจัยและสนับสนุนอุปกรณ์การ ทดสอบ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lang, L.H., "Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die base on an innovative hydromechanical deep

drawing method," Journal of Materials Processing Technology, Vol.167, 2005, p 191

- [2] 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
- [3] Lang, L.H., "Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank," International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application (Electronic), 2004, 44, p 495, Available: ELSEVIER / Science Direct (3 June 2010)
- [4] Kang, D. "A study on hydrodynamic deep drawing equipment," Journal Materials Processing Technology (Electronic), 2000, 101, p 21, Available: ELSEVIER / Science Direct (3 June 2010)
- [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 (Electronic), 2004, 44, p 649, Available: ELSEVIER / Science Direct (3 June 2010)
- [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, p 114
- [7] พงศ์พันธ์ แก้วตาพิทย์ และ วารุณี เปรมานนท์, "การศึกษาอิทธิพลของความสูงตายแลนตีในกรณีวิธ การลากขึ้นรูปลึก," การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547, จังหวัดขอนแก่น, 2547
- [8] มอก.977-2551 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่
- [9] Standard JIS B 5012 : 2008 Coild helical spring for press dies

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชญญพัฒน์ เจียรละม่อม
วัน เดือน ปีเกิด	22 ธันวาคม 2523
ที่อยู่	98 หมู่ 10 ตำบลวังไก่อเลื้อย อำเภอหันคา จังหวัดชัยนาท 17130
การศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (การผลิต) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรเทคนิค บริษัท เอ็นซีอาร์-รับเบอร์ จำกัด วิศวกรคุณภาพ บริษัท ศรีจินดา-สหกิจ จำกัด ครู แผนกวิชาเทคนิคอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท
เบอร์โทรศัพท์	083-164-6286
อีเมล	j.thanyapat@hotmail.com