

อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงและความแข็งผิวในการขึ้นรูปแผ่นโลหะ  
ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

**THE INFLUENCE OF PARAMETERS ON FORCE AND HARDNESS  
OF SHEET METAL FORMING WITH SINGLE POINT  
INCREMENTAL FORMING PROCESS**

ศิริโชค แหยมเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

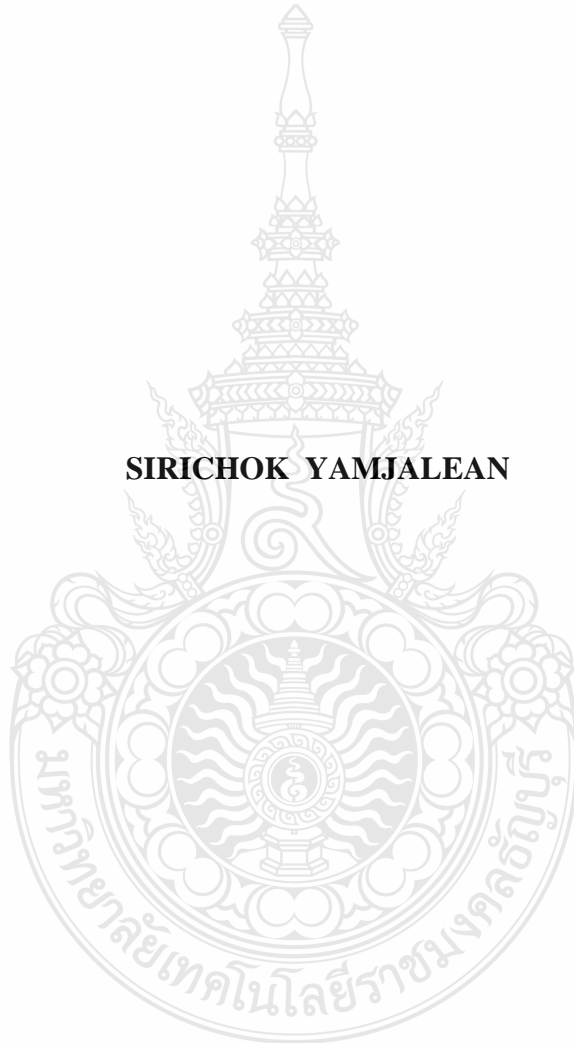
อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงและความแข็งผิวในการขึ้นรูปแผ่นโลหะ  
ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

ศิริโชค แหยมเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**THE INFLUENCE OF PARAMETERS ON FORCE AND HARDNESS  
OF SHEET METAL FORMING WITH SINGLE POINT INCREMENTAL  
FORMING PROCESS**

**SIRICHOK YAMJALEAN**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE  
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI  
ACADEMIC YEAR 2014  
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงและความแข็งผิวในการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด
ชื่อ-สกุล	นายศิริโชค แหยมเจริญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนเดิยวามีขนาดเล็กและจำนวนน้อย การขึ้นรูปสำเร็จโดยปราศจากแม่พิมพ์และกำลังของเครื่องจักรที่น้อย โดยใช้หัวกดรูปทรงกลมขึ้นรูปโลหะแผ่น และควบคุมการเคลื่อนที่เชิงตัวเลข ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปแบบนี้ต้องมีการควบคุมตัวแปรการขึ้นรูปให้เหมาะสมจึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงและความแข็งผิวในการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

ในการศึกษานี้จะใช้การขึ้นรูปแผ่น โลหะด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดโดยการขึ้นรูปแผ่นโลหะ อลูมิเนียม ทองเหลือง และทองแดง ให้เป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดเล็ก 20 โดยมีตัวแปรในการศึกษาคงนี้ ซึ่งการขึ้นรูปจะใช้ตัวแปรต่างๆ กันดังนี้คือ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ 30, 40 และ 50 องศา และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ในการทดสอบจะบันทึกขนาดของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป และชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำไปตรวจสอบและวัดขนาดค่าความแข็งผิว

ผลการทดลองพบว่าตัวแปรทั้งสามมีผลอิทธิพลต่อแรงและค่าความแข็งที่เกิดขึ้น โดยมุมและความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูปมากขึ้น แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและค่าความแข็งผิวจะน้อยลง โดยวัสดุที่ใช้แรงในการขึ้นรูปและค่าความแข็งผิวหลังการขึ้นรูปน้อยที่สุดคือแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่มุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที และวัสดุที่ใช้แรงในการขึ้นรูปและค่าความแข็งผิวหลังการขึ้นรูปมากที่สุดคือ วัสดุแผ่นโลหะทองเหลืองที่มุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที

**คำสำคัญ:** มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด

<b>Thesis Title</b>	The Influence of Parameters on Force and Hardness of Sheet Metal Forming with Single Point Incremental Forming Process
<b>Name-Surname</b>	Mr. Sirichok Yamjalean
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2014

## ABSTRACT

A single point incremental process, was developed as a theoretically ideal process for a small batch, especially small components. The process is beneficial in terms of mold less and low forming power. In this process, the products will be formed an exact shape by using a spherical head tool which is traveling by means of a numerical control. The purpose of this research is to study the influences of the process parameters on forming force and resulting hardness of the single point incremental process.

The experiment was carried out by using a single point incremental process to form a truncated pyramid with 20 mm. of depth. There were three process parameters such as forming angle, rotation speed and workpiece material. The process angle were applied at 30, 40 and 50 degrees and 200, 400 and 600 rpm of the rotation speeds. In addition, the experiments were performed on 3 categories of materials, aluminum, brass, and copper. In order to investigate the influences, the forming forces were recorded. The finished produced were carefully examined and tested.

The results of the experiments revealed that all parameters including materials, forming angle, and rotation speed influenced directly on the forming force and hardness of the workpiece. In addition, an increasing of forming angle and tool rotation speed resulted in a lower level of forming force and resulting hardness. The lowest forming force was found when forming an aluminum material with forming angle of 50 degrees and tool rotation speed of 600 rpm. In contrast, the highest forming force was found when forming brass materials using forming angle of 30 degrees and tool rotation speed of 200 rpm.

**Keywords:** forming angle, tool rotation speed

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้จากการช่วยเหลือของผู้มีอุปการะคุณ ที่ให้ข้อเสนอแนะ ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และคณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข และดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ที่ให้คำแนะนำในการจัดทำ ให้งานสำเร็จตามวัตถุประสงค์

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ พี่ชาย ญาติ และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจ ตลอดมาประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยครั้งนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของท่านข้างต้นผู้วิจัย รู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ศิริโชค แหมมเจริญ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	(4)
กิตติกรรมประกาศ .....	(5)
สารบัญ .....	(6)
สารบัญตาราง .....	(8)
สารบัญภาพ.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	13
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย .....	14
1.3 สมมุติฐานการวิจัย .....	14
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 แนวความคิด.....	16
2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในลักษณะต่างๆ ....	17
2.3 แรงเสียดทาน .....	23
2.4 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการกดขึ้นรูป .....	23
2.5 วัสดุที่ใช้เป็นเครื่องมือในการกดขึ้นรูป .....	26
2.6 คุณสมบัติที่สำคัญของสารหล่อลื่น .....	27
2.7 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ .....	28
2.8 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ .....	29
2.9 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่นและระนาบความเค้น .....	41
2.10 ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก .....	44
2.11 การทดสอบความแข็ง .....	46
2.12 การวัดแรง.....	48
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	50
3.1 การศึกษารวบรวมข้อมูล.....	50
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมการทดลอง.....	50
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	52
3.4 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง .....	60
3.5 การเปรียบเทียบสรุปผลการทดลอง .....	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	62
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรที่มีผลต่อแรงขณะทำการขึ้นรูป	62
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งผิวที่เกิดขึ้น หลังการขึ้นรูป .....	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	96
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป .....	97
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป .....	97
บรรณานุกรม .....	98
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง .....	101
ภาคผนวก ข ส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติทางกล .....	105
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	109
ประวัติผู้เขียน.....	116



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทั่วไปของเหล็ก JIS SKD 11 .....	27
ตารางที่ 3.1 ตารางส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป .....	51



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด.....	13
ภาพที่ 2.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด .....	16
ภาพที่ 2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป .....	17
ภาพที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์ .....	18
ภาพที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั้นขึ้นรูป.....	19
ภาพที่ 2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง.....	19
ภาพที่ 2.6 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด .....	20
ภาพที่ 2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ .....	21
ภาพที่ 2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์เฉพาะส่วน) .....	22
ภาพที่ 2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแบบแม่พิมพ์เต็ม .....	22
ภาพที่ 2.10 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ.....	30
ภาพที่ 2.11 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ.....	33
ภาพที่ 2.12 แอนไอโซโทรปี .....	35
ภาพที่ 2.13 ขึ้นทดสอบตามทิศทางการรีด.....	39
ภาพที่ 2.14 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง .....	41
ภาพที่ 2.15 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด .....	42
ภาพที่ 2.16 ทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นขณะโลหะถูกแรงกระทำ .....	43
ภาพที่ 2.17 (ก) การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก (ข) ขึ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดง ค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก .....	43
ภาพที่ 2.18 แนวคิดพื้นฐานในการดึงขึ้นรูปลึก .....	45
ภาพที่ 2.19 กลไกการดึงขึ้นรูปลึก (ก) ช่วงแรกของการดึงขึ้นรูปซึ่งจะเกิดเฉพาะการตัด (ข) บริเวณที่เกิดความเค้นอัดในระหว่างกระบวนการ .....	45
ภาพที่ 2.20 การดึงขึ้นรูป และการดึงขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า $r > 50\%$ .....	46
ภาพที่ 2.21 ลักษณะห้วงคดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers .....	47
ภาพที่ 2.22 ตัวอย่างของค่า Static Sensitivity .....	48
ภาพที่ 3.1 เครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูป .....	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่น โลหะ .....	53
ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป.....	53
ภาพที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป .....	54
ภาพที่ 3.5 เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน.....	54
ภาพที่ 3.6 เครื่องตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมวัดความแข็ง .....	55
ภาพที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานที่ถูกตัดเพื่อเตรียมวัดความแข็งและตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความแข็ง .	55
ภาพที่ 3.8 เครื่องอัด BAKELITE เพื่อเตรียมวัดความแข็ง .....	56
ภาพที่ 3.9 ลักษณะชิ้นงานที่ถูกอัดเพื่อเตรียมวัดความแข็ง .....	56
ภาพที่ 3.10 เครื่องขัดชิ้นงาน .....	57
ภาพที่ 3.11 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ .....	57
ภาพที่ 3.12 มุม เส้นทางการเดิน และค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป .....	58
ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานหลังทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรูปขึ้นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด .	59
ภาพที่ 3.14 หน้าจอแสดงแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป .....	60
ภาพที่ 3.15 หน้าตัดแสดงจุดที่ทำการความแข็งวัดหลังการขึ้นรูป.....	60
ภาพที่ 4.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 200 รอบต่อนาที.....	63
ภาพที่ 4.2 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 400 รอบต่อนาที.....	64
ภาพที่ 4.3 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 600 รอบต่อนาที.....	65
ภาพที่ 4.4 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 200 รอบต่อนาที.....	66
ภาพที่ 4.5 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 400 รอบต่อนาที .....	67



## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.19 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 200 รอบต่อนาที.....	81
ภาพที่ 4.20 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 400 รอบต่อนาที.....	82
ภาพที่ 4.21 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 600 รอบต่อนาที.....	83
ภาพที่ 4.22 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 200 รอบต่อนาที.....	84
ภาพที่ 4.23 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 400 รอบต่อนาที.....	85
ภาพที่ 4.24 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 600 รอบต่อนาที.....	86
ภาพที่ 4.25 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 200 รอบต่อนาที.....	87
ภาพที่ 4.26 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 400 รอบต่อนาที.....	88
ภาพที่ 4.27 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของทูลที่ 600 รอบต่อนาที.....	89
ภาพที่ 4.28 ค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นของวัสดุขณะทำการขึ้นรูป .....	90
ภาพที่ 4.29 ค่าความแข็งผิวที่เกิดขึ้นของวัสดุหลังทำการขึ้นรูป.....	93
ภาพที่ 4.30 การยึดตัวของแผ่น โลหะอลูมิเนียมหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วในการหมุนของ เครื่องมือกด 200 รอบต่อนาที ที่มุม 30, 40 และ 50 องศา.....	94
ภาพที่ 4.31 โครงสร้างของแผ่น โลหะทองเหลืองหลังการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา ที่ความเร็ว ในการหมุนของเครื่องมือกด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที .....	95

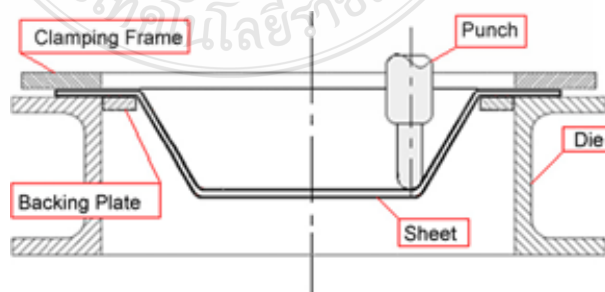
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งในปัจจุบันนั้นการขึ้นรูปโลหะแผ่นซึ่งใช้แม่พิมพ์ในการบังคับทิศทางการไหลของโลหะเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ มีการใช้เครื่องจักรในการกดขึ้นรูปแม่พิมพ์ ที่ใช้กำลังในการกดอัดที่สูงเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีการเสนอแนวคิดใหม่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป [1] นั่นก็คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสแบบจุด ซึ่งสามารถใช้ขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน โดยตอบสนองต่อการลดกำลังที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น อุปกรณ์ที่ใช้ไม่มีความซับซ้อน และลดกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นจากเดิม [2] ทำให้ความซับซ้อนในการผลิตจากกระบวนการขึ้นรูป ลดลงเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นในปัจจุบัน

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ดังภาพที่ 1.1 วิธีนี้เป็นการทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรเฉพาะตำแหน่งบนแผ่นโลหะ โดยใช้เครื่องมือรูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนรอบแกนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่กำหนดด้วยระบบคอมพิวเตอร์กดลงบนชิ้นงาน โลหะแผ่นที่ถูกยึดตรึงให้แน่นอยู่ในชุดจับยึดไปตามเส้นทางที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม (CAM) [3] และใช้เครื่องกัดแนวตั้ง CNC Milling Arrow 500 เป็นเครื่องมือกลที่ใช้ในการขึ้นรูป การทดลองนี้มุ่งเน้นถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้น ในบริเวณที่ถูกทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร [4] บนแผ่นโลหะ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม



ภาพที่ 1.1 ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด [5]

ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษากการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุแผ่นโลหะทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียม ที่มีความสามารถในการขึ้นรูปได้สูงและเป็นที่ยอมรับในงานอุตสาหกรรม ลักษณะการทำงาน มีดังต่อไปนี้ คือ มีการใช้อุปกรณ์ขึ้นรูป รูปทรงกระบอกที่มีปลายรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด โดยวัดแรงที่เกิดขึ้นด้วยอุปกรณ์วัดแรงประเภท Load cell และมีระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตซึ่งนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายๆประเภทในปัจจุบัน

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งผิวที่เกิดขึ้นหลังจากทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปจากกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยแผ่นโลหะที่ใช้การขึ้นรูปชิ้นงานที่แตกต่างกันนั้นจะมีความแตกต่างกันไป

1.3.2 มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในขณะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

1.3.3 มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อค่าความแข็งผิวที่เกิดขึ้นหลังทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 สร้างอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะขนาด 90x150 มิลลิเมตร

1.4.2 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป

1.4.2.1 แผ่นโลหะอลูมิเนียม(AA1100-H14) ความหนา 0.6 มิลลิเมตร ขนาด 90x150 มิลลิเมตร

1.4.2.2 แผ่นโลหะทองแดง(C1100P-1/4H) ความหนา 0.6 มิลลิเมตร ขนาด 90x150 มิลลิเมตร

1.4.2.3 แผ่นโลหะทองเหลือง(C2801P-1/4H) ความหนา 0.6 มิลลิเมตร ขนาด 90x150 มิลลิเมตร

- 1.4.3 การทดลองจะใช้เครื่องจักรกัดแนวตั้ง CNC Milling Arrow 500
- 1.4.4 การทดลองที่ใช้จะเหล็กกล้าเครื่องมือตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD11 ทำการขึ้นรูปเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูป (Punch) ด้วยเครื่องกลึง CNC ให้ปลายของอุปกรณ์ มีลักษณะครึ่งทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร
- 1.4.5 การทดสอบใช้สารหล่อลื่น ประเภทจารบี เกรด SG 306
- 1.4.6 มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป มี 3 มุมคือ 30, 40 และ 50 องศา
- 1.4.7 ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูป มี 3 แบบคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที
- 1.4.8 อัตราการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกดในการเดินขึ้นรูปคือ 200 มิลลิเมตรต่อนาที
- 1.4.9 การทดลองมีระยะการกดลงไปแนวตั้งครั้งละ 0.5 มิลลิเมตร จนได้ความลึก 20 มิลลิเมตร
- 1.4.10 วิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปแผ่นโลหะทั้งสามชนิด
- 1.4.11 วิเคราะห์ความแข็งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะของแผ่นโลหะทั้งสามชนิด

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

- 1.5.1 สามารถทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด
- 1.5.2 สามารถทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด



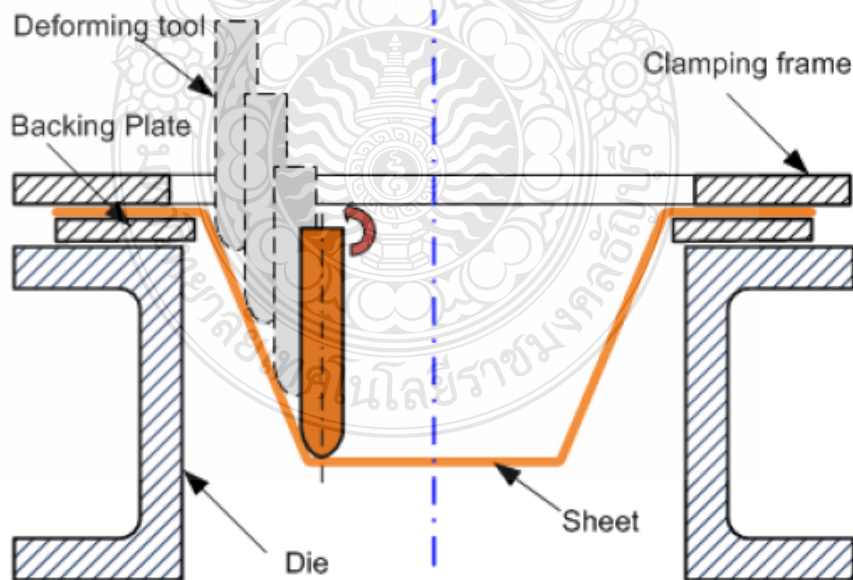
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวความคิด

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นลักษณะการทำงานแนวใหม่ในการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง โดยมีลักษณะคล้ายกับการทำงานด้วยกระบวนการปั้นขึ้นรูป และการดึงขยายชิ้นงาน ซึ่งมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรอีกด้วย โดยแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยชุดจับยึดและถูกกดขึ้นรูปโดยหัวกดลงไปทำให้เกิดการเสียรูปถาวรเฉพาะจุดบนแผ่นโลหะ โดยใช้ทุลรูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [3-9] โดยในจุดที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวรนั้นเป็นพื้นที่เล็กๆที่เกิดจากการสัมผัสกันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับพื้นผิวของแผ่นโลหะซึ่งก่อให้เกิดความเค้นกดขึ้นเป็นผลให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร ดังภาพที่ 2.1

#### Single Point Forming Process



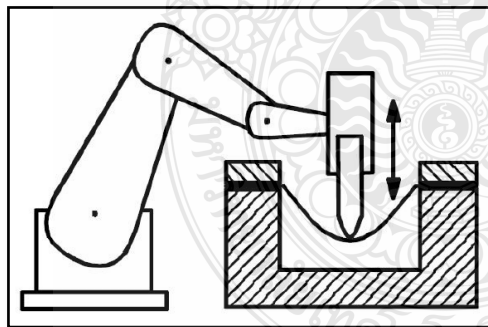
ภาพที่ 2.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด [15]

## 2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในลักษณะต่าง ๆ

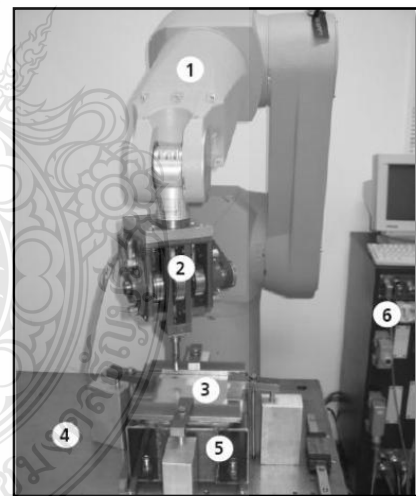
มีกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นหลายๆแบบที่ใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยกรรมวิธีนี้ ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปแบบเดิม โดยบางส่วนของกระบวนการที่จะกล่าวถึง จะมีลักษณะการทำงานพื้นฐานที่คล้ายคลึงกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะกล่าวถึงถึงภาพรวมโดยย่อของทางเทคนิคของกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องดังต่อไปนี้ [10]

### 2.2.1 กระบวนการกดขึ้นรูป

การกดขึ้นรูปเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่เก่าที่สุด การกดหมายถึงการทำให้โลหะต่างๆ ให้เป็นรอยนูนขึ้นคล้ายๆ กรรมวิธีการปั๊ม ในอดีตการกดขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ต้องกระทำด้วย ที่ต้องอาศัยความชำนาญ ความสามารถเฉพาะ ต้องใช้เทคนิคของช่างแต่ละคน แต่ในปัจจุบันกระบวนการกดขึ้นรูปโลหะได้มีการนำเทคโนโลยี CNC และเทคโนโลยีการใช้หุ่นยนต์มาควบคุมในการทำงาน ในการเคลื่อนที่ไปในจุดต่างๆ แล้วทำการกดลงบนพื้นผิวโลหะที่ถูกทำการจับยึดในแต่ละขั้นตอนของการทำงานที่ถูกกำหนด ดังภาพที่ 2.2



(ก) ลักษณะของการกดขึ้นรูป

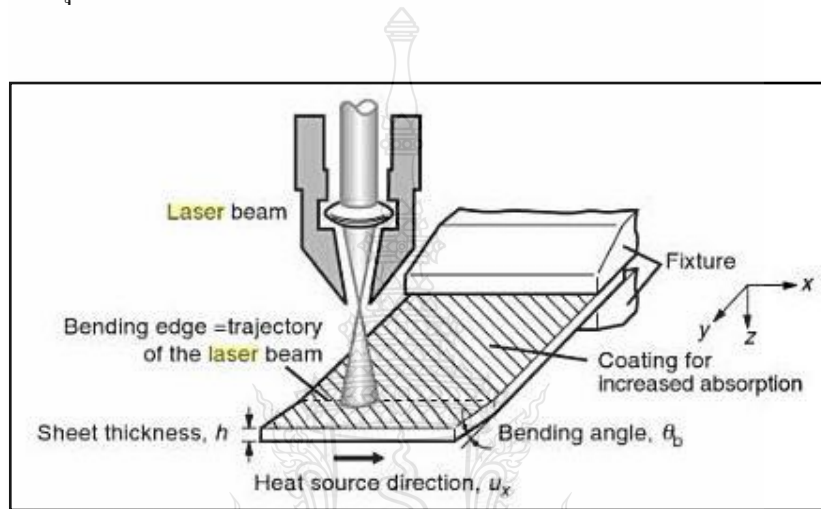


(ข) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

ภาพที่ 2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป [10]

## 2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์

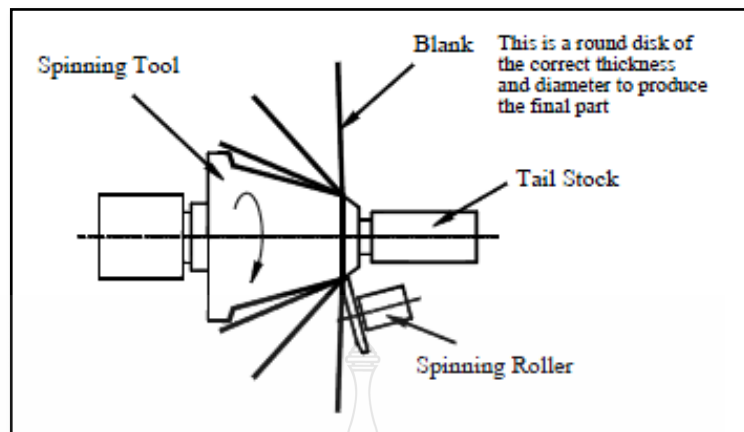
การขึ้นรูปวัสดุด้วยเลเซอร์ หรือ Laser Forming ถือเป็นกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางกลและทางความร้อน (Thermo-mechanical Forming Process) โดยหลักการของ Laser Forming คือการฉายลำแสงเลเซอร์ลงบนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดความเครียดบนพื้นผิวแผ่นโลหะที่ถูกจับยึด ด้วยความร้อนจากการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิว และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจะเกิดการโค้งงอของวัสดุ ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์ [10]

## 2.2.3 กระบวนการปั้นขึ้นรูป

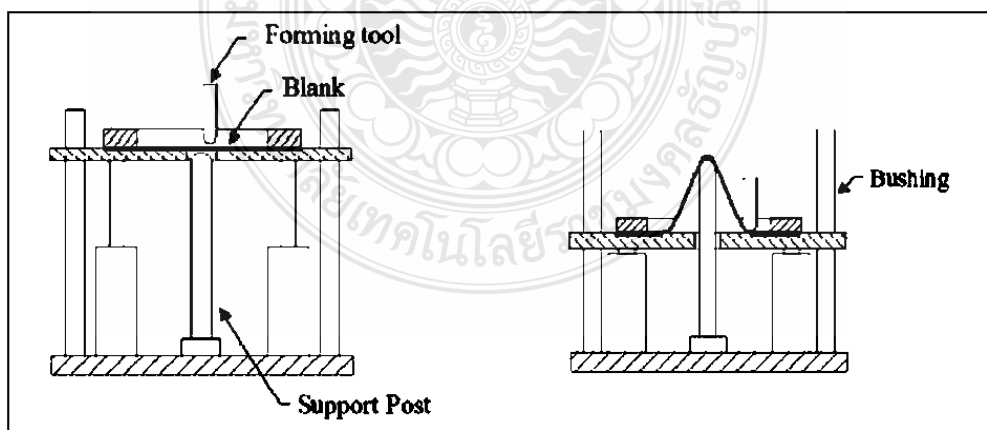
การขึ้นรูปโลหะแผ่นบางที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโพรงในรูปทรงต่างๆ การขึ้นรูปจะเริ่มขึ้นโดยการนำแผ่นชิ้นงานกลม (Blank) มาติดกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ให้มีจุดศูนย์กลางตรงกันแล้วจึงนำศูนย์ท้ายแทน มาค้ำให้แผ่นชิ้นงานแนบสนิทกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ขั้นต่อไปจะหมุนแม่พิมพ์สปินนิ่งทำให้แผ่นชิ้นงานและศูนย์ท้ายแทนหมุนตามไปด้วย หลังจากนั้นจึงนำลูกกลิ้งมารีดแผ่นชิ้นงานให้แนบไปตามแม่พิมพ์สปินนิ่ง แผ่นชิ้นงานจะค่อยๆ ถูกขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องในบริเวณเล็กๆ ที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับแผ่นชิ้นงานตามการเคลื่อนที่ของแผ่นชิ้นงานรอบๆ แกนการหมุนของแม่พิมพ์สปินนิ่ง ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั่นขึ้นรูป [10]

#### 2.2.4 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง (Incremental Sheet Forming Process)

ในปี 1994 Matsubara [5] ได้พัฒนากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการใช้การกระทุ้งขึ้นจากด้านล่าง โดยให้แผ่นขึ้นงานทดสอบถูกจับยึดบนแท่นที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้ โดยตรงกลางของแผ่นขึ้นงานจะถูกรองรับโดยแท่นรองรับหรือทูล และมันจะถูกควบคุมความเร็วในการหมุนโดยเครื่องจักร CNC และแท่นที่ใช้จับยึดขึ้นงานก็จะถูกกดลงสู่ด้านล่างตามระยะที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 2.5 โดยกรรมวิธีนี้สามารถผลิตขึ้นงานได้ทั้งในลักษณะที่มีรูปทรงสมมาตร และไม่สมมาตร

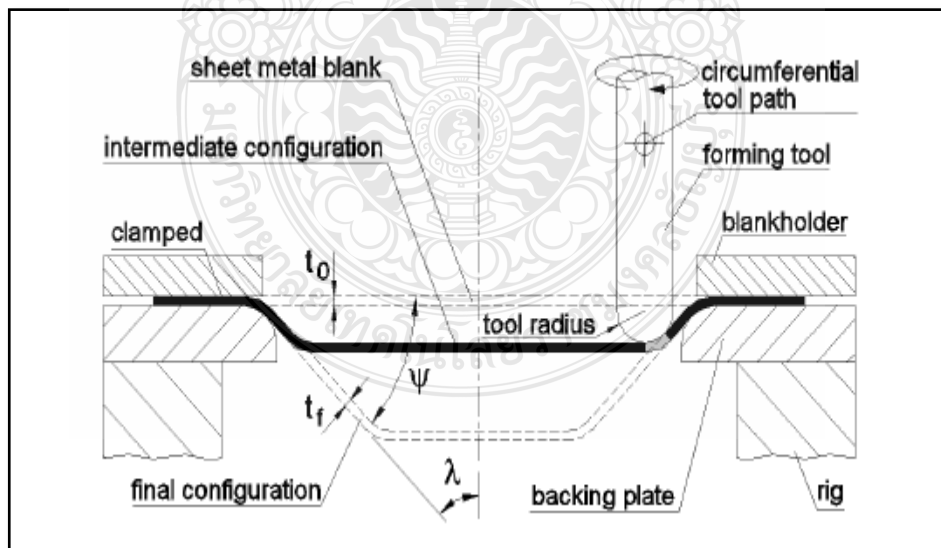


ภาพที่ 2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง [10]

โดยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องได้ถูกพัฒนากระบวนการทำงานออกไปใน 3 ลักษณะ คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยสัมผัสเป็นจุด (The Single Point Incremental Forming) กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยมีทูลเคลื่อนที่รองรับ (The Incremental Forming with Counter Tool) และกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (The Two Point Incremental Forming) โดยในส่วนต่อไปจะเป็นการนำเสนอลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องทั้ง 3 ลักษณะ

#### 2.2.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

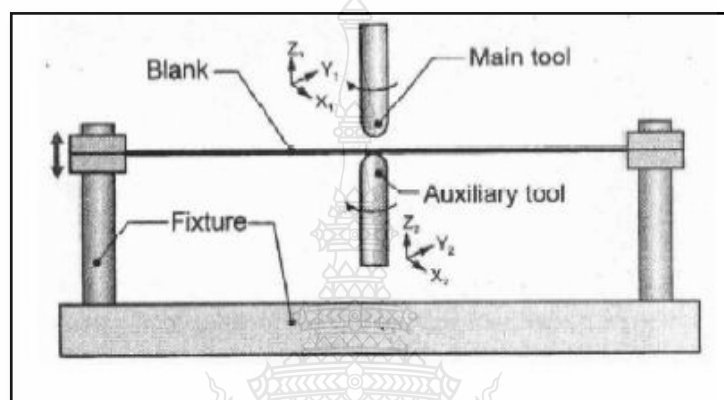
กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นลักษณะการทำงานแนวใหม่ในการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง โดยมันมีลักษณะคล้ายกับการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูป และการดึงขยายชิ้นงาน ซึ่งมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรอีกด้วย โดยแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยชุดจับยึดและถูกกดขึ้นรูปโดยหัวกดลงไปทำให้เกิดการเสีรูปร่างเฉพาะจุดบนแผ่นโลหะ โดยใช้ทูลรูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด และทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วยระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [3] โดยในจุดที่เกิดการเสีรูปร่างอย่างถาวรนั้นเป็นพื้นที่เล็กๆที่เกิดจากการสัมผัสกันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับพื้นผิวของแผ่นโลหะซึ่งก่อให้เกิดความเค้นกดขึ้นเป็นผลให้เกิดการเสีรูปร่างอย่างถาวร ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด [5]

## 2.2.6 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงานจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ที่ไม่มีการใช้แผ่นรองยึดด้านล่างและใช้อุปกรณ์ในการขึ้นรูปเสริมในด้านล่างของแผ่นชิ้นงานและเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันอุปกรณ์ขึ้นรูปหลัก



ภาพที่ 2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ [10]

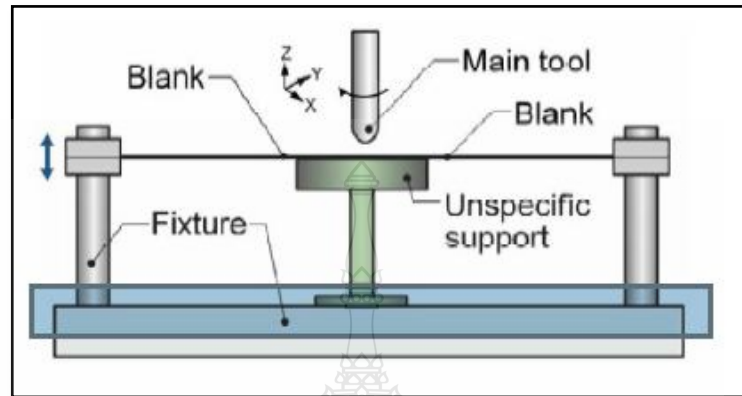
## 2.2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดบนชุดยึด จุดที่สามารถปรับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวแกน Z โดยใช้ทูลในการขึ้นรูปที่มีรูปร่างในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยให้ทูลทำการกดลงบนของแผ่นชิ้นงานด้านบน จากบนลงล่างตามลักษณะรูปทรงของชิ้นงานที่กำหนด โดย กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ถูกแบ่งลักษณะการทำงานเป็น 2 แบบ ตามลักษณะของแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนไป คือ แบบแม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน และ แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน

## 2.2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน)

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ แผ่นรองหลัง ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด เพียง แต่มันจะทำการรองรับเฉพาะพื้นที่ที่ถูกกำหนดของแผ่นชิ้นงาน และกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงของรูปทรงของชิ้นงาน ในลักษณะของงานที่มีการขึ้นรูปด้วยรูปทรงที่ไม่ตรง

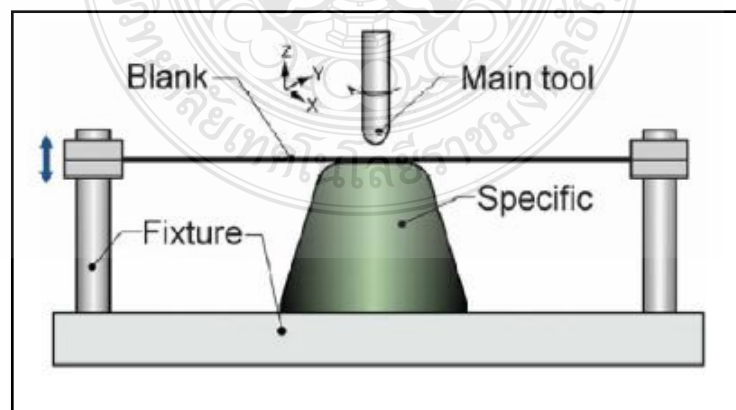
ตามแบบทางเรขาคณิต อีกทั้งยังสามารถนำ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน ไปผลิตชิ้นงานอื่นๆ ที่มีความคล้ายคลึงได้ต่อไปอีกด้วย



ภาพที่ 2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์เฉพาะส่วน) [10]

### 2.2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดในแบบ (แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน)

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดในแบบ (แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน) สามารถเรียกได้ว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ในลักษณะนี้ไม่อยู่ในแนวทางการทำงานที่จะไม่ใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป แต่มันก็ช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงในการขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างมาก เนื่องจาก ในขณะที่ทำการขึ้นรูป แผ่นงานจะถูกบังคับโดยทูลให้ขึ้นรูปไปตามกับขนาดแม่พิมพ์ที่ได้กำหนดไว้



ภาพที่ 2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแบบแม่พิมพ์เต็ม [10]

## 2.3 แรงเสียดทาน (Frictional force)

แรงเสียดทาน (Frictional force) คือแรงที่เกิดจากผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชนิดเมื่อวัตถุถูกแรงมากระทำ มีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ แรงเสียดทานมี 2 ชนิดคือ

- 1) แรงเสียดทานสถิต
- 2) แรงเสียดทานจลน์

แรงเสียดทานสถิต (Static Frictional Force) เกิดจากมีแรงมากระทำต่อวัตถุแต่แรงที่มากกระทำนั้นมีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตวัตถุจึงไม่เคลื่อนที่ แรงเสียดทานสถิตมีค่าตั้งแต่ 0 จนถึงค่ามากที่สุด (วัตถุเริ่มเคลื่อนที่) เช่น ออกแรงกระทำกับมวลแล้ววัตถุเริ่มเคลื่อนที่ เราสามารถหาค่าแรงเสียดทานจลน์จากอัตราส่วนระหว่างแรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ต่อแรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อวัตถุ

## 2.4 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

### 2.4.1 คุณสมบัติของทองเหลือง

ทองเหลือง (Brass) คือ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายได้ในทองแดงในรูปของสารละลายของแข็ง (Solid Solution) คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานการกัดกร่อน และมีความสามารถในการขึ้นรูปและคุณสมบัติอื่น ๆ ตลอดจนสีของทองเหลืองเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม ทองเหลืองที่ใช้งานในทางวิศวกรรม จะมีปริมาณสังกะสีไม่เกิน 40% เนื่องจากหากมีสังกะสีมากเกินไปจะทำให้ทองเหลืองมีความเปราะขาดความเหนียว จึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองต่างๆไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่มคือ ประเภทรีดเป็นแท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrough Copper Alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast Copper) ซึ่งทั้งสองกลุ่มจะแยกชั้นคุณภาพ ในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลมักจะกล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักและใช้งานกันอยู่เป็นประจำซึ่งมีอยู่ไม่มากนัก โดยแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังต่อไปนี้

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

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

3) Alpha-beta Brass (Muntz Metal หรือ Called Duplex Brass) มีสังกะสี 35-45% เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิสูง ประกอบด้วย  $\alpha$  กับ  $\beta'$  phase



4) Aluminium Brass (Nordic Gold) ประกอบด้วยอลูมิเนียม ทนทานการกัดกร่อน ใช้ทำเหรียญยูโร

5) Arsenical Brass มีส่วนผสมของสารหนู และมักจะใส่อลูมิเนียมด้วย ใช้ทำหม้อของห้องเผาไหม้

6) Beta Brasses มีสังกะสี 45-50% ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงทนทาน เหมาะกับการหล่อ

7) Cartridge Brass มีสังกะสี 30% มีคุณสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

8) Common Brass (rivet brass) มีสังกะสี 37% ราคาถูกและใช้ในที่เย็นได้

9) DZR Brass มีส่วนผสมของสารหนูเล็กน้อย มีคุณสมบัติต่อต้านปฏิกิริยา Dezincification

10) Gilding Metal เป็นทองเหลืองที่อ่อนที่สุด มีทองแดง 95% และสังกะสี 5% มักใช้เป็นส่วนประกอบของกระสุน

11) High Brass มีทองแดง 65% และสังกะสี 35% มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ทำสปริง สกรู หมุด

12) Leaded brass คล้ายกับชนิด alpha-beta Brass แต่ใส่ตะกั่วเพิ่ม มีความสามารถในการขึ้นรูปโลหะสูง

13) Low Brass เป็นโลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี มีสังกะสี 20% มีสีทองอ่อนๆ สามารถทำให้เป็นเส้นบางๆ ได้ดีเยี่ยม ใช้ทำท่อส่งน้ำ/แก๊สที่ยืดหยุ่นสูง

14) Naval Brass คล้ายกับ Admiralty Brass มีสังกะสี 40% และดีบุก 1%

15) Red Brass สูตร คือ CuZnSn มักเรียกว่า gunmetal

16) Rich Low Brass มีทองแดง 85% สังกะสี 15% ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับ

17) White Brass มีสังกะสีมากกว่า 50% เปราะบาง

18) Yellow Brass มีสังกะสี 33%

\*แมงกานีสจะให้ผลในการเพิ่มกำลังวัสดุของทองเหลืองได้มาก จึงเรียกทองเหลืองที่มีแมงกานีสผสมอยู่นี้ว่าบรอนซ์แมงกานีส (Manganese Bronze)

#### 2.4.2 คุณสมบัติของอลูมิเนียม

อลูมิเนียม (ภาษาอังกฤษสะกดได้ว่า aluminium หรือ aluminum ในอเมริกาเหนือ) คือธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Al และมีเลขอะตอม 13 เป็นโลหะทรานซิชันที่มันวาวและอ่อน

ดัดง่าย ในธรรมชาติอลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก และมีคุณสมบัติเด่น คือ ต่อต้านการออกซิเดชันเป็นเยี่ยม (เนื่องจากปรากฏการณ์ passivation) แข็งแรง และน้ำหนักเบา มีการใช้อลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และอลูมิเนียมสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกอย่างมาก ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอลูมิเนียมสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน และสำคัญในด้านอื่น ๆ ของการขนส่งและการสร้างอาคาร ซึ่งต้องการน้ำหนักเบา ความทนทาน และความแข็งแรง อลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 ล้านปาสกาล (MPa) และ 400 MPa ถ้าทำเป็นโลหะผสม อลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดง อ่อน สามารถดัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อนและความทนเนื่องจากชั้นออกไซด์ที่ป้องกัน พื้นหน้ากระจกเงาที่เป็นอลูมิเนียมมีการสะท้อนแสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 200-400 nm (UV) และ 3000-10000 nm (IR ไกล) ส่วนในช่วงที่มองเห็นได้ คือ 400-700 nm โลหะเงินสะท้อนแสงได้ดีกว่าเล็กน้อย และในช่วง 700-3000 (IR ใกล้) โลหะเงินทองคำ และทองแดง สะท้อนแสงได้ดีกว่า อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ดัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็นอันดับที่ 6 อลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมที่จะทำหม้อหุงต้มอาหาร อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงต่ำ แต่สามารถนำไปผสมกับธาตุต่าง ๆ ได้ง่าย เช่น ทองแดง สังกะสี แมกนีเซียม แมงกานีส และซิลิกอน (เช่น duralumin) ในปัจจุบันวัสดุเกือบทั้งหมดที่เรียกว่าอลูมิเนียมเป็นโลหะผสมของอลูมิเนียม อลูมิเนียมบริสุทธิ์พบเฉพาะเมื่อต้องการความทนต่อการกัดกร่อนมากกว่าความแข็งแรงและความแข็ง เมื่อรวมกับกระบวนการทางความร้อนและการ (thermo-mechanical processing) โลหะผสมของอลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้น โลหะผสมอลูมิเนียมเป็นส่วนสำคัญของเครื่องบินและจรวดเนื่องจากมีอัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

คุณสมบัติของอลูมิเนียม

- 1) ทนต่อการสึกกร่อน
- 2) มีคุณสมบัติด้านเคมีที่ดี
- 3) ง่ายต่อการแมชชีน
- 4) ความแข็งแรงต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง
- 5) มีคุณสมบัติด้านตัวนำไฟฟ้า
- 6) เป็นตัวนำความร้อนที่ดี

7) สามารถสะท้อนความร้อนและแสง

8) ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก

9) สามารถดึงได้ (เช่น ลวด เป็นต้น)

#### 2.4.3 คุณสมบัติของทองแดง (Copper)

ทองแดง มีใช้กันมาตั้งแต่สมัยอาณาจักรโรมัน ทองแดงเป็นโลหะชนิดแรกที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ ทองแดงมีหลากหลายรูปร่าง เช่น แท่งทองแดง แผ่นทองแดง ท่อทองแดง เป็นต้น ทองแดงซีท (Copper sheet) จะมีความหนาน้อยกว่า 1/4 นิ้ว ส่วนทองแดงแผ่น (Copper plate) จะหนา กว่า 1/4 นิ้ว

คุณสมบัติของทองแดง

1) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุทธองจากเงิน

2) เป็นตัวนำความร้อนที่ดี

3) เปลี่ยนรูปได้ง่าย

4) มีความต้านทานต่อการผุกร่อน

### 2.5 วัสดุที่ใช้เป็นเครื่องมือในการกดขึ้นรูป

เหล็กกล้าเครื่องมือมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 [16] เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น วัสดุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ในระดับสูงและ โครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ภายหลังการชุบแข็งและอบคืนตัว (Tempering) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการกลึงไสที่ต่ำมากและมีความเหนียวที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่น ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นๆ ดังนี้

1) มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมาก

2) มีความเหนียวแรงพอใช้

3) ชุบแข็งได้ลึกมาก มีความสามารถในการชุบแข็งสูงมาก และชุบแข็งในเตาสุญญากาศได้

4) ต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี

5) เกิดการบิดงอเล็กน้อยมากหลังการชุบแข็ง

6) ต้านทานการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ดี

- 7) สามารถทำไนไตรดิงหลังการชุบแข็งได้
- 8) สามารถเคลือบผิวด้วยเทคนิคพีวีดีได้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก JIS SKD 11

ส่วนผสมทางเคมี (% wt.)	C	Cr	Mo	V
	1.55	12.0	0.7	1.0
AISI	D2			
JIS	SKD - 11			
DIN	1.2379 / x 155CrVMo12 - 1			
สภาพจำหน่าย	อบอ่อนความแข็งสูงสุด 250 HB			
สภาพหลังชุบ	ชุบแข็ง และอบคืนตัว 58 – 62 HRC			

## 2.6 คุณสมบัติที่สำคัญของสารหล่อลื่น [11], [12]

ค่าความหนืด (Viscosity) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติการต้านการไหลหรือความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นว่ามีความหนืดมากน้อยเท่าไร ค่าความหนืดมีหลายมาตรฐานที่ใช้ แต่ที่พบบ่อยนิยมบอกด้วยมาตรฐาน ISO สำหรับน้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรม และ มาตรฐาน SAE สำหรับน้ำมันหล่อลื่นยานยนต์ ส่วนมาตรฐานอื่น ๆ ได้แก่ AGMA (พบในน้ำมันเกียร์) SUS (เซโบลท์ยูนิเวอร์แซล) เป็นต้น

ส่วนจะเลือกใช้ความหนืดเท่าไรนั้น ให้ยึดตามที่ผู้ผลิตเครื่องจักรแนะนำไว้ก่อน แต่อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม ทั้งนี้แต่ละมาตรฐานสามารถเทียบไปได้

ค่าดัชนีความหนืด (VI : Viscosity Index)-เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของน้ำมันหล่อลื่นนั้นว่าความหนืดของน้ำมันจะสามารถคงสภาพได้ดีเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถแบ่งได้ 3 ระดับ คือ

1) ค่าดัชนีความหนืดต่ำ (LVI : Low viscosity index) คือ ความหนืดของน้ำมันสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อสภาพอุณหภูมิเปลี่ยนไป

2) ค่าดัชนีความหนืดปานกลาง (MVI : Medium viscosity index) คือ ความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปปานกลางเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

3) ค่าดัชนีความหนืดสูง (HVI : High viscosity index) คือ ความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงได้ยากหรือเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อสภาพอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

จุดวาบไฟ (Flash point) ค่าอุณหภูมิต่ำที่สุดซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ในสภาวะที่กำหนดสามารถก่อให้เกิดไอรระเหยปริมาณที่เพียงพอต่อการผสมกับอากาศและเกิดส่วนผสมที่พอเพียงต่อการติดไฟ เมื่อมีประกายไฟหรือเปลวไฟเข้ามาใกล้ ๆ

จุดไหลเท (Pour point) ค่าอุณหภูมิที่น้ำมันหล่อลื่นเริ่มไม่มีการไหลตัว โดยการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจะถูกปล่อยให้เย็นตัวลงในภาชนะ โดยปล่อยให้อุณหภูมิลดลงเป็นลำดับ จนกระทั่งน้ำมันหล่อลื่นไม่มีการไหล ทดสอบภายใน 5 วินาที แล้ววัดอุณหภูมินั้นเป็น Pour point ซึ่งค่านี้มักถูกนำไปพิจารณากับสารหล่อลื่นที่นำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เช่น น้ำมันคอมเพรสเซอร์ทำความเย็น เป็นต้น

จารบี ค่าความแข็งแรงอ่อนเป็นค่าบ่งบอกถึงความแข็งแรงอ่อนของเนื้อจารบี กำหนดโดย สถาบันแห่งชาติในการกำหนดมาตรฐานจารบี (NLGI : National Lubricating Grease Institute) วัดด้วยเครื่องมือวัดการเจาะลึก (Penetrometer) โดยใช้กรวยมวลมาตรฐานปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระที่อุณหภูมิ 25°C รอานาน 10 วินาที แล้ววัดระยะลึก (หน่วยเป็น 1/10 mm) จากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปจัดลำดับความแข็งแรงอ่อน โดยเบอร์ยิ่งน้อย เนื้อจารบีจะมีความอ่อนนุ่ม เบอร์ยิ่งมาก เนื้อจารบีจะยิ่งแข็ง

สำหรับค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงค่าสำคัญหลัก ๆ ที่มักพบกับสารหล่อลื่นทุกประเภทและต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้สารหล่อลื่น ยังมีค่าอื่น ๆ อีกที่อาจต้องนำมาพิจารณาแล้วแต่สารหล่อลื่นนั้นว่าจะนำไปใช้กับงานแบบใด

## 2.7 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation of material) [13]

กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่วัสดุได้รับแรงมากระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรูปร่าง ถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตาม มันก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

2.7.1 สลิป (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัว หรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวของอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ถึงแม้ว่าจะไม่มี ความเค้นใดๆ แต่ผลึกนั้นๆ ก็จะไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีกเลย

2.7.2 ทวินนิง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูปอันเนื่องมาจากกระแยะหรือแนวของผลึกเกิดการถูกเงื่อนไขให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกันหรือเหมือนกัน โดยที่ ทิศทางในการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลขที่เดียว

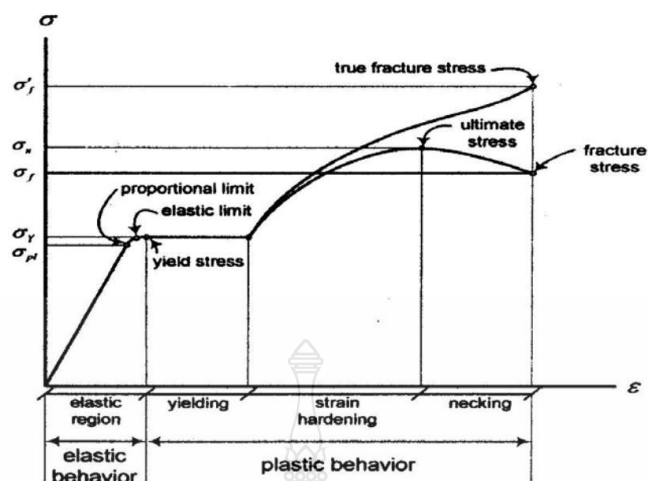
2.7.3 ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรง มาจากภายนอกเข้ามากระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง

## 2.8 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ [13]

ทฤษฎีในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะวัสดุแผ่น (Sheet Metal) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงถาวร (Plasticity) และพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elasticity) เมื่อวัสดุซึ่งได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรที่กระทำออก วัสดุจะคืนตัวเล็กน้อยเมื่อไม่ได้รับแรงกระทำ ในส่วนพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจนวัสดุเลยจุดคลาด (Yield Point) ถ้านำแรงที่กระทำออกวัสดุจะไม่กลับคืนตัว วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร คุณสมบัติทางกลที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูปของวัสดุโลหะแผ่นคือค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (True Stress-Strain Relation) ซึ่งในกรณีที่ใช้กฎยกกำลัง (Power Law) จะต้องหาค่าคุณสมบัติของค่า Strength Coefficient ( $K$ ) และ Strain Hardening Exponent ( $n$ ) โดยค่า  $n$  เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าวัดค่า  $n$  มีค่ามากจะทำให้โลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปดี และค่าคุณสมบัติที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางในแนวระนาบ (Planar Anisotropy) ซึ่งค่าที่สำคัญคือค่า  $R$  ( $r$ -value หรือ Plastic Strain Ratio) หาได้จากสัดส่วนความเครียดในแนวความกว้างกับความเครียดในแนวความหนา ซึ่งค่า  $R$  เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในด้านความต้านทานการหดตัวในแนวความหนา เนื่องจากเหล็กแผ่นผ่านการรีดมาทำให้อนุภาคภายในมีทิศทางตามแนวรีด ส่งผลให้ความสามารถในการยืดหดตัวของเหล็กแผ่นแตกต่างกัน ดังนั้นในการหาค่า  $R$  จำเป็นต้องหาอย่างน้อย 3 แนว คือค่า  $R$  ในทิศตามแนวรีดทิศ  $45^\circ$  กับแนวรีด และทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด ถ้าวัดค่า  $R$  แตกต่างกันมาก จะทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปยาวไม่เท่ากันหรือการเป็นคลื่นที่ขอบชิ้นงาน (Earing)

### 2.8.1 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory)

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัวออกเป็น 2 ส่วน หลัก ๆ คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกและการเปลี่ยนรูปถาวรหรือช่วงพลาสติก ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [9]

คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริงเนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทางทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง (Uni-Axial Tension Test) หรือการทดสอบกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกระงับกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง ( $F$ ) อย่างช้า ๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุขึ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถหาได้ โดยนำแรงภายนอก  $F_i$  ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน [9]

$$\sigma = \frac{F_i}{A_o} \quad (2.1)$$

โดย  $F_i$  คือ แรงดึงหรือโหลด  $A_o$  คือพื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นทดสอบ และ  $\sigma$  คือ ความเค้นเฉลี่ย หรือความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด  $A_o$

สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จาก ความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L_i - L_o}{L_o} \quad (2.2)$$

โดย  $\Delta L$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป  $L_o$  คือความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ  $L_i$  คือความยาวขณะใดขณะหนึ่งและ  $\varepsilon$  คือความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง  $F$  ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ซึ่งในการทดสอบจริง ในขณะที่ระดับความเค้นในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลยความเค้นคลาก พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนเกิดคอคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะ ซึ่งเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True Stress True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้า  $\tilde{\sigma}$  เป็นความเค้นจริงและ  $\tilde{\varepsilon}$  เป็นความเครียดจริง

$$\tilde{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} = \sigma \left( \frac{A_o}{A_i} \right) \quad (2.3)$$

โดย  $A_i$  คือพื้นที่หน้าตัดใด ๆ  $A_o$  คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น  $\sigma$  คือความเค้นเฉลี่ย  $F_i$  คือแรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ

สำหรับความเครียดจริง  $\tilde{\varepsilon}$  สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใด ๆ ที่เพิ่มขึ้นซึ่งหาได้จากการ อินทิเกรตความยาว  $dL_i$  ใด ๆ

$$\tilde{\varepsilon} = \int_{L_o}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_o} \quad (2.4)$$



ในกรณีการขึ้นรูปโลหะมีปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จะสมมติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม

$$A_o L_o = A_i L_i \quad (2.5)$$

$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{L_i}{L_o} = \frac{L_o + \Delta L}{L_o} = 1 + \varepsilon \quad (2.6)$$

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริงโดยสมมติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่

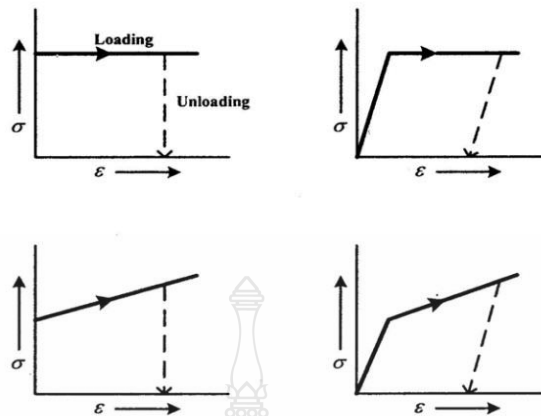
$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.7)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln \frac{A_o}{A_i} = 2 \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (2.8)$$

โดย  $d_i$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางใดๆ  $d_o$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

## 2.8.2 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory)

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการจะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงวัสดุพบว่าพฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติกพฤติกรรมเหล่านี้ อยู่ด้วยกันหลายลักษณะซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [9]

ในการพิจารณาการเปลี่ยนรูป จะใช้เกณฑ์การคลาก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูป จากอลาสติกไปเป็นพลาสติก และทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนายการคลากตัวของโลหะแผ่นคือ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Treska Yield Theory) ทฤษฎีพอนมิเชส (Von Misses Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) ในส่วนของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีของพอนมิเชสจะมีข้อสมมุติฐานว่าวัสดุมีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ส่วนทฤษฎีของฮิล จะพิจารณาอิทธิพลของโลหะที่ผ่านการรีด (Anisotropy) ในการใช้กฎเกณฑ์การคลาก สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้ทฤษฎีการคลากของฮิล ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับวัสดุโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก [9]

### 2.8.3 เกณฑ์การคลาก (Yield Criteria)

ทฤษฎีของพอนมิเชสหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Theory) ซึ่งพอนมิเชส ได้เสนอว่าการคลากจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานแปรรูปภายในเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะที่แรงกระทำมีค่าเท่ากับพลังงานแปรรูป จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบ ซึ่งก็คือค่าความเค้นเบี่ยงเบนอันดับสอง  $J_2$  ซึ่ง  $J_2 = k_2$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.9)$$

ในกรณีของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรงดึง  $\sigma_1 = \sigma_o, \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_o$

$$J_2 = \frac{1}{6}(\sigma_o^2 + \sigma_o^2) = k \quad (2.10)$$

$$\sigma_o = \sqrt{3}k \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\sigma_o$  คือความเค้นคลาก

$k$  คือความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดึงวัสดุ

สำหรับวัสดุทดสอบที่ได้รับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว  $\tau = \sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$  เมื่อแทนลงในสมการที่ 2.9 [9] จะได้สมการการคลากคือ

$$\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2 = 6k \quad (2.12)$$

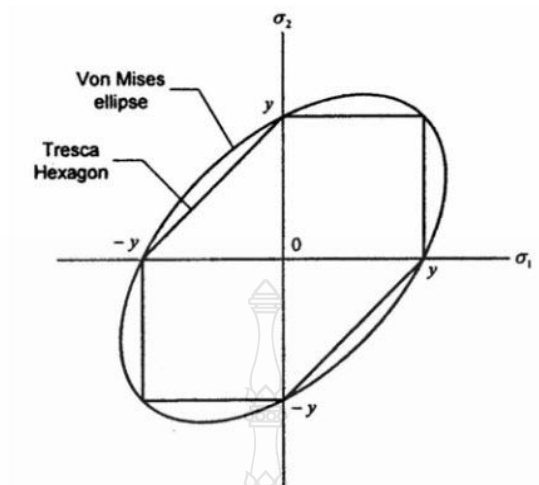
$$\sigma_1 = k \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.11 และ 2.13 จึงสามารถหาค่า  $k$  ได้คือ

$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} = \sigma_1 \quad (2.14)$$

จาก  $J_2 = k^2$  สามารถจัดสมการที่ 2.9 และ 2.14 ได้ใหม่คือ

$$\sigma_o = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$



ภาพที่ 2.12 แอนไอโซโทรปี [9]

จะเห็นได้ว่าการคลากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  เท่าของความเค้นคลากที่ได้จากการดึงวัสดุทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งสองโดยพิจารณาจากภาพที่ 2.3 ซึ่งแสดงกรอบการแตกหักของวัสดุพบว่าทฤษฎีของฟอนมิเชลส์ ให้ผลการทำนายการคลากใกล้เคียงมากกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น [9]

#### 2.8.4 ทฤษฎีแอนไอโซทรอปีของ Hill 1948

ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปีโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าวัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะโดยแกนไอโซทรอปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ  $x, y$  และ  $z$  ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรสองหน้า (ระนาบ  $x-y, y-z$  และ  $z-x$  คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง  $x, y$  และ  $z$  เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงคลากและแรงกดคลากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การคลากแอนไอโซทรอปีที่เสนออยู่ในรูป [10]

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อ  $F, G, H, L, M$  และ  $N$  คือค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณสมบัติของไอโซทรอปิกสังเกต  
 ว่าถ้า  $F=G=H$  และ  $L=M=N=3F$  สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของพอนมิเชส ค่าคงตัว  $F, G$  และ  
 $H$  สามารถประเมินได้จากการทดสอบการดึง  
 พิจารณาการทดสอบในทิศทาง  $x$  และให้  $X$  เป็นความเค้นดึงคลาก ขณะคลาก

$$\begin{aligned}\sigma_x &= X \\ \sigma_y &= \sigma_z = \tau_{ij} = 0\end{aligned}$$

ดังนั้น สมการที่ 2.16 เป็น

$$(G+H)X^2 = 1 \quad (2.17)$$

หรือ

$$X^2 = \frac{1}{(G+H)}$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้า  $Y$  และ  $Z$  คือความเค้นดึงคลากในทิศทาง  $y$  และ  $z$

$$\begin{aligned}X^2 &= \frac{1}{G+H} \\ Y^2 &= \frac{1}{H+F} \\ Z^2 &= \frac{1}{F+G}\end{aligned} \quad (2.18)$$

แก้สมการพร้อมกันได้

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \\ 2G &= \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ในกรณีของโลหะแผ่นวัด  $Z$  ได้ยาก ค่าคงตัว  $L$ ,  $M$  และ  $N$  สามารถหาได้จากการทดสอบการเลื่อน  
กฎการไหลสามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial f(\sigma_{ij})} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $f(\sigma_{ij})$  คือฟังก์ชันการคลาก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หาคอนพังก์ชันของ  
สมการที่ 2.20 ได้กฎการไหล

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda \left[ H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z) \right], d\varepsilon_{yx} = d\varepsilon_{zy} = d\lambda L \tau_{yz} \\ d\varepsilon_y &= d\lambda \left[ F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{zx} = d\varepsilon_{xz} = d\lambda L \tau_{zx} \\ d\varepsilon_z &= d\lambda \left[ H(\sigma_z - \sigma_y) + G(\sigma_z - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{xy} = d\varepsilon_{yx} = d\lambda L \tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ในการหากฎไหลสำหรับความเครียดเฉือน  $d\varepsilon_{yz}$ ,  $d\varepsilon_{zx}$  และ  $d\varepsilon_{xy}$  ต้องเขียนเกณฑ์การคลากสมการที่  
2.16 ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเฉือนปรากฏในรูป

$$L(\tau_{yz}^2 + \tau_{zy}^2) + M(\tau_{zx}^2 + \tau_{xz}^2) + N(\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2)$$

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ  $d\varepsilon_{yz} = 2 \cdot d\lambda L \tau_{yz}$  และ  
 $d\varepsilon_{zy} = 0$  สังเกตว่าสมการที่ 2.21 คือ  $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$  แสดงว่า ปริมาตรคงตัวพิจารณาการ

ทดสอบการดึงในทิศทาง x อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า  $\sigma_x = X$  ,  $\sigma_y = \sigma_z = 0$  ในสมการที่ 2.21 ได้  
ความเครียด

$$\begin{aligned}d\varepsilon_x &= d\lambda(H + G)X \\d\varepsilon_y &= -d\lambda(H)X \\d\varepsilon_z &= -d\lambda(G)X\end{aligned}\tag{2.21}$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x นิยามว่า

$$R = R_0 = \left( \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z} \right)$$

ดังนั้น

$$R = \frac{H}{G}\tag{2.22}$$

ในทำนองเดียวกัน นิยามให้  $P = R_{90}$  คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน Y  
 $P = d\varepsilon_x / d\varepsilon_z$  เมื่อ  $\sigma_y = Y$  และ  $\sigma_x = \sigma_z = 0$  จากสมการที่ 2.21 ได้

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

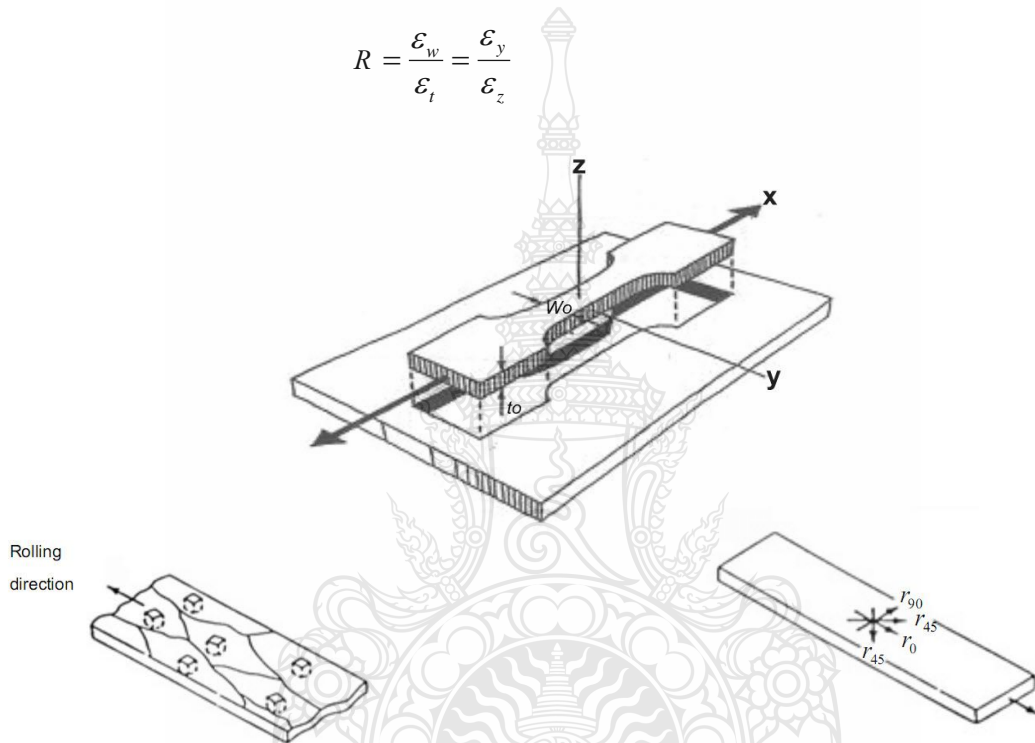
### 2.8.5 พลาสติกแอนไอโซทรอปี (Plastic Anisotropy)

สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปีก็คือ  
ทิศทางของเกรนทิศทางที่เป็นไปหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กกล้าที่เกิดจากการหมุนของ  
แลคทิสในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลีปหรือการทวิน (Twinning) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูป  
ของชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ตัดออกมาจากแผ่นรีด เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกน สามารถ  
เกิดการคลากได้เฉพาะโดยการสลีปในระนาบความต้านแรงดึงคลากของชิ้นทดสอบที่ตัดทำมุม  $\theta$  กับ  
ทิศทางการรีด ไม่แปรผันกันมากนัก ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่าวัสดุเป็นไอโซทรอปี ความผิดพลาดอาจ  
เกิดขึ้นได้ถ้าวัดความดึงเครียดในแนวขวางซึ่งเป็นผลมาจากการดึง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความหนา

ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การยึดในแนวยาวมีผลทำให้ความกว้างขึ้นทศสอบลดลง [10]

พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์คืออัตราส่วน  $R$  ของความเครียดพลาสติกเมื่อ  $w$  และ  $t$  คือทิศทางความกว้างและความหนาของขึ้นทศสอบการดึงตามลำดับ ดังนั้น  $\varepsilon_w = \ln(w/w_0)$  และ  $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$  สำหรับวัสดุไอโซทรอปิก  $R = 1$

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.24)$$



ภาพที่ 2.13 ขึ้นทศสอบตามทิศทางการรีด [14]

ภาพที่ 2.13 ในการวัดค่า  $R$  ถึงแม้ว่า มินิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนว กว้าง  $\varepsilon_w$  ต่อแนวหนาความเครียดในแนวหนา  $\varepsilon_t$  ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง เพราะฉะนั้นความเครียดในแนวหนามักหาได้จากการวัดความเครียดในแนวยาวและแนวกว้างโดยใช้ ปริมาตรคงตัว  $\varepsilon_t = (\varepsilon_l + \varepsilon_w)$  เพื่อการวัดที่แม่นยำ ควรใช้ภาคตัดลดลงให้ค่อนข้างยาวมากเมื่อเทียบกับ ความกว้าง และภาคตัดทดสอบที่ใช้วัดค่า  $\varepsilon_t$  และ  $\varepsilon_w$  ควรอยู่ห่างจากบ่ามาก

บางครั้งค่า  $R$  ไม่แปรผันตามความเครียด เพราะฉะนั้น อัตราส่วนของความเครียด ที่เพิ่มขึ้น  $d\varepsilon_w/d\varepsilon_t = R$  ค่า  $R$  คงตัวมีความสำคัญเมื่อใช้  $R$  ประเมินค่าคงตัวในเกณฑ์การคลากไอโซ ทรอปิก



สำหรับเหล็กกล้าค่า  $R$  และ โมดูลัสยืดหยุ่น  $E$  มักแปรผันคล้ายกันตามเนื้อรูปผลึก แม้ว่าสหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นยำ แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งวัดค่า  $E$  ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า  $R$  ได้ โดยปกติค่า  $R$  มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ  $\theta$  และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า  $R$  เฉลี่ยคือ  $\bar{R}$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (2.25)$$

### 2.8.6 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ความเครียดแข็งเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวที่ใช้ในงานขึ้นรูปเย็น เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำผ่านจุดกลางตัวทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นภายในวัสดุ จึงต้องใช้แรงที่มากกว่าเดิมในการทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับการวิเคราะห์วัสดุแบบ อีลาสติก - พลาสติก ได้แสดงพฤติกรรมความเครียดแข็งของวัสดุ ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น จะเป็นในลักษณะเชิงเส้นการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เกิดความเครียดเป็นสัดส่วนซึ่งหลักการนี้จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) [13]

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าความเค้น  
 $E$  คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือ โมดูลัสของยัง  
 $\varepsilon$  คือ ค่าความเครียด

สำหรับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปในช่วงพลาสติก ครั้งนี้เป็นไปตามกฎยกกำลัง (Power Law) [13]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.27)$$

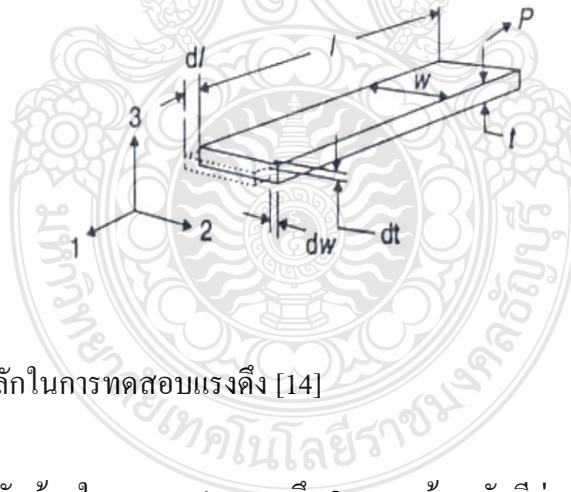
เมื่อ  $K$  คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength coefficient)  
 $n$  คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain - hardening exponent)

สำหรับค่าตัวเลขกำลังหรือความเครียดแข็ง  $n$  และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง  $K$  สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า  $\log$  เข้าไปในสมการยกกำลังซึ่งทำให้สามารถได้สมการใหม่

$$\log \sigma = n \log \varepsilon + \log K \quad (2.28)$$

## 2.9 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น และระนาบความเค้น (General Sheet Processes ; Plan stress)

ภาพที่ 2.14 เป็นการทดสอบการดึงเป็นแนวทางการกระบวนการหาระนาบความเค้น (Plane stress) การทดสอบการดึงแกนเดียว (Uniaxial tension) คือการแสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเค้น การดึงแกนเดียว (Uniaxial tension) ให้พิจารณาจุดเล็ก ๆ ในชิ้นทดสอบในการดึงให้เปลี่ยนรูปแกนเดียวทำการทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนรูปที่น้อยจนถึงสูงสุดเราพิจารณาพื้นที่หน้าตัดระหว่างเปลี่ยนรูปลักษณะของจุดเล็ก ๆ (Element) ยังคงตั้งฉากแต่ละทิศทางไม่มีความเคลื่อนที่เกี่ยวกับทิศทางหลัก 1, 2 และ 3



ภาพที่ 2.14 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง [14]

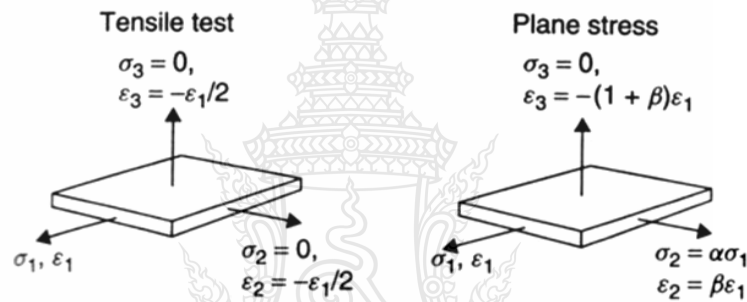
ในทางตรงกันข้ามในการทดสอบการดึง 2 ความเค้นหลักมีค่า เป็นศูนย์ในลักษณะชิ้นส่วนเล็ก ๆ ที่เปลี่ยนรูปค่าความเค้น 1 และ 2 ไม่เท่ากับศูนย์ ความเค้น 3 คือตั้งฉากกับผิว แท้จริงเกิดจากการสัมผัสระหว่างแผ่นบางกับ Tooling โดยทั่วไปแล้วน้อยกว่าจุด Yield ของวัสดุ จะให้เป็นศูนย์ได้ และให้เป็น Plane stress deformation [9]

### 2.9.1 อัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress and strain ratios) [15]

ในความหมายเฉพาะที่กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของจุดเล็ก ๆ Element ในแต่ละเทอมของอัตราส่วนความเครียด (Strain ratio,  $\beta$ ) หรืออัตราส่วนความเค้น (Stress ratio,  $\alpha$ ) สำหรับวิธี Proportional ค่าความจริงที่ใกล้เคียงที่สุด ดังภาพที่ 2.15

ในหลักทฤษฎาดังนั้นให้  $\sigma_1 > \sigma_2$  และทิศทางทั้งสามตั้งฉากกับพื้นผิว เมื่อ  $\sigma_3 = 0$  ลักษณะการเปลี่ยนรูป

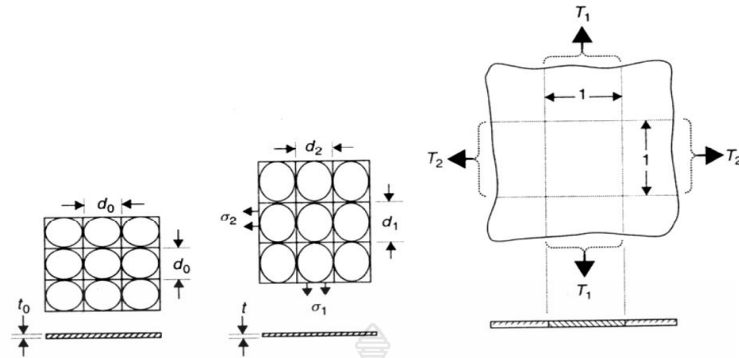
$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \beta \varepsilon_1; & \varepsilon_3 &= -(1 + \beta) \varepsilon_1 \\ \sigma_2 &= \alpha \sigma_1; & \sigma_3 &= 0 \end{aligned}$$



ภาพที่ 2.15 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด [15]

### 2.9.2 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

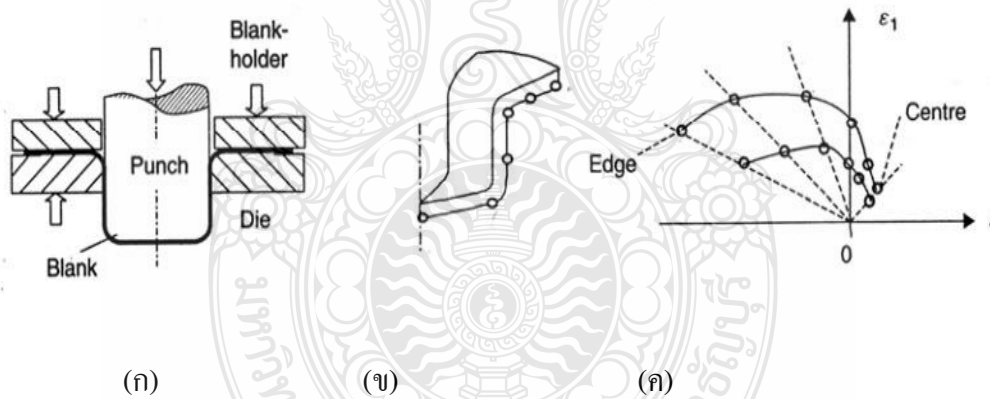
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ในภาพที่ 2.16 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา  $t_0$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_0$  หรือตารางขนาด  $d_0$  ดังภาพที่ 2.16 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ  $d_1$  แกนของ Minor คือ  $d_2$  ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.16 (ข) ส่วนความหนา คือ  $t$  ตามที่กรณี ดังภาพที่ 2.16 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  [13]



ภาพที่ 2.16 ทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นขณะโลหะถูกแรงกระทำ [13]

### 2.9.3 แผนภาพความเครียด (Strain diagram) [15]

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.17 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมในรูปที่ 2.16



ภาพที่ 2.17 (ก) การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก (ข) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก [15]

ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains) [9] ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} ; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} ; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2.30)$$

อัตราส่วนของความเครียด (Strain ratio) [9] โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง ดังสมการที่

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}{\ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right)} \quad (2.31)$$

ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness) [9]

จากสมการที่ 2.30 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) โดยให้พิจารณาว่าการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta)\ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.32 ความหนาโดยทั่วไปคือ

$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.33)$$

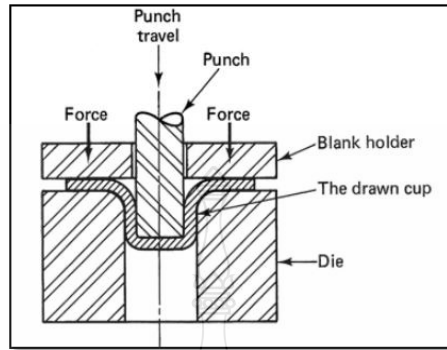
หรืออีกแนวทางหนึ่งที่มีปริมาตร  $td_1d_2 = t_0d_0^2$  ที่มีปริมาตรคงที่

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2} \quad (2.34)$$

## 2.10 ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing operation)

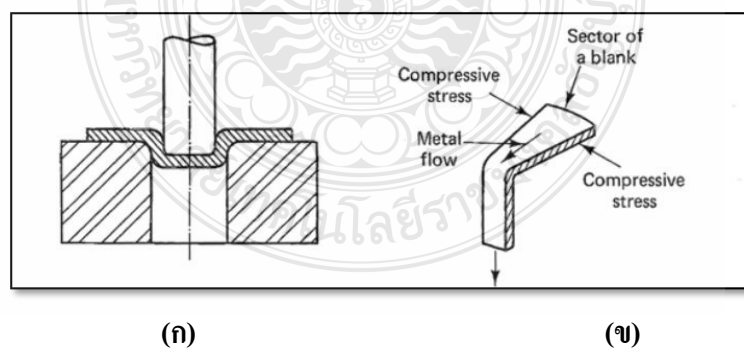
การดึงขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์รูปถ้วย หรือรูปเปลือกที่มีขอบสูง จากโลหะแผ่น ดังแสดงในภาพที่ 2.18 เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยชุดแม่พิมพ์ ที่มีขอบพ่นซ์และคายเป็นรัศมีโค้ง ( $R > t$ ) เมื่อมีแรงกดกระทำที่ แผ่นโลหะชิ้นงานผ่านพ่นซ์ แผ่นโลหะชิ้นงานจะไหลเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นแนวรัศมีเข้าหาศูนย์กลางและเปลี่ยนรูป จากแผ่นเป็นชิ้นงานรูปเปลือก การศึกษาในเรื่องของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกเป็นเรื่องที่ซับซ้อน การที่จะทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้นนั้นจะแบ่ง

ออกเป็นการศึกษาส่วนของกระบวนการ และในที่นี่เราจะกล่าวถึงการศึกษส่วนของกลไกการขึ้นรูปในการขึ้นรูปลึก



ภาพที่ 2.18 แนวคิดพื้นฐานในการดึงขึ้นรูปลึก [13]

กลไกการดึงขึ้นรูปลึก (Mechanics of Deep Drawing) เมื่อพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นกระบวนการ จากภาพที่ 2.18 แผ่นวัตถุจะเริ่มถูกตัดที่บริเวณรัศมีขอบคายน และเมื่อเพิ่มภาระกระทำที่ตัวพื้นซ์ให้มากขึ้น ทำให้แผ่นโลหะที่ถูกตัดบริเวณรัศมีคายนจะถูกดึง (หรือตัดกลับ) ให้เป็นเส้นตรงอยู่ระหว่างช่องว่างของพื้นซ์และคายนเกิดเป็นผนังหรือเปลือกของชิ้นงานรูปถ้วยด้วยเดีย ๆ หลังจากนั้น แผ่นโลหะที่อยู่ด้านนอกจะเริ่มไหลเข้าช่องเปิดคายนมากขึ้น แต่เนื่องจากที่ผิวด้านล่างของแผ่นโลหะที่สัมผัสอยู่กับผิวคายนทำให้เกิดแรงเสียดทานต้านทานการไหลของแผ่นโลหะ

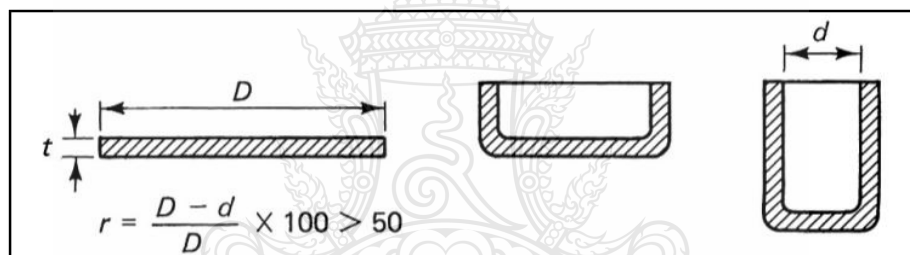


ภาพที่ 2.19 กลไกการดึงขึ้นรูปลึก [13]

- (ก) ช่วงแรกของการดึงขึ้นรูปซึ่งจะเกิดเฉพาะการตัด
- (ข) บริเวณที่เกิดความเค้นอัดในระหว่างกระบวนการ

จากกลไกคั้งที่กล่าวกระบวนการคั้งขึ้นรูปประกอบไปด้วยช่วงการรับภาระลักษณะต่างๆ กันของแผ่นโลหะ คือ ช่วงการคั้ง ช่วงการคั้งให้ตรง (หรือการคั้งคลับ) ส่งผลให้การเสียรูปอย่างถาวรของแผ่นโลหะเกิดขึ้นไม่เท่ากัน ดังภาพที่ 2.19 แผ่นโลหะที่บริเวณปีก (หรือขอบชิ้นงาน) ก่อนไหลเข้าสู่ช่องเปิดคายจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวง ในขณะที่ส่วนที่ไหลผ่านบ่าคายจะมีความหนาลดลงเนื่องจากความเค้นแรงคั้งในแนวรัศมี ส่วนที่บางที่สุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของผนัง ด้วยเหตุนี้ถ้าในระหว่างกระบวนการคั้งขึ้น รูปลึกชิ้นงานมักจะเสียหายจากการฉีกขาดที่บริเวณ ผนัง ก้นด้วยเป็นส่วนใหญ่

ในอุตสาหกรรมการผลิตถ้าต้องการชิ้นงานรูปถ้วยที่มีคุณภาพดี ไม่มีการฉีกขาดจะใช้ค่า  $r$  น้อยกว่า 50% ใน กรณีที่ต้องการคั้งขึ้นรูปลึกมาก (ค่า  $r$  มากกว่า 50%) จะทำการคั้งขึ้นรูปสองครั้ง แต่ในกรณีที่คั้งขึ้นรูปซ้ำมากกว่า 3 ครั้ง ขึ้นไป ต้องนำชิ้นงานไปทำการอบอ่อนทุกๆ 2 ครั้ง การคั้งขึ้นรูป เสมอ เพื่อขจัดผลจากความเครียดแข็ง และหลีกเลี่ยงการแตกร้าว และเสียหายของ ผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2.20 การคั้งขึ้นรูป และการคั้งขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า  $r > 50\%$  [13]

## 2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) [17]

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการกดซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวคัมมิตั้งที่เป็นแบบหัวบอลแบบบรนาบหรือแบบกรวยปลายมนหรือพีระมิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักกดที่โดยการวัดน้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น

การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม  $136^\circ$  ดังภาพที่ 2.21 และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกัน

กับการทดสอบความแข็ง Brinell คือ ค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด และจากภาพที่ 2.21 สามารถหาพื้นที่ของรอยกดได้ดังสมการ 2.35

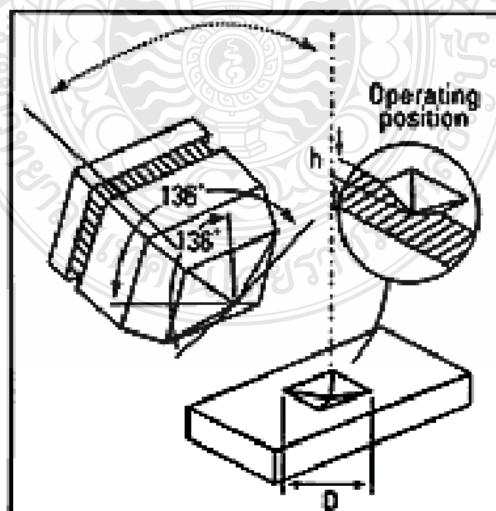
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin (136^\circ / 2)} \quad \text{ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544} \quad (2.35)$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ 2.36

$$\text{จากความแข็ง Vickers} = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่รอยกด}} \quad (2.36)$$

$$\text{จะได้} \quad \text{DPH} = \frac{1.8544 F}{d^2} \quad (2.37)$$

เมื่อ DPH คือ ความแข็ง Vickers ( $\text{kg/mm}^2$ ) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย ( $\text{mm}^2$ )



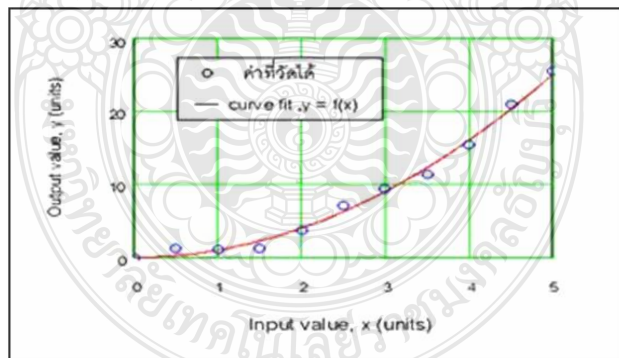
ภาพที่ 2.21 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [17]



ในการทดสอบนำชิ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบจากนั้นยกแท่นวางขึ้นจนชิ้นงานเข้าใกล้หัวคดจนนั้นให้ปลดลือระบบคานน้ำหนักจะถูกส่งไปยังหัวคดในอัตรา 20 : 1 อย่างต่อเนื่องจากนั้นนำน้ำหนักคดออกลดระดับแท่นวางลงนำชิ้นงานไปส่งกล้องจุลทรรศน์เพื่อทำการวัดเส้นทแยงมุมของรูปรอยกดลือเหลี่ยมที่ปรากฏ

## 2.12 การวัดแรง [8]

ในการวัดแรงโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์แบบแบบสเตรนเกจ (Strain Gage) นั้น มีทฤษฎีในการทำงานดังนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะนั้นถูกกระทำภายใต้โหลด ซึ่งเป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความเครียด (Strain) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้การวัดแรงนั้นจะถูกเรียกว่า โหลดเซลล์ โดยโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ จะเปลี่ยนแรงที่มากระทำเป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องมือวัดแบบนี้ยึดติดกับ โครงสร้างที่มีการเปลี่ยนรูปเมื่อมีแรงหรือน้ำหนักมากระทำ ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว ในการวัดเพื่อให้ได้ความไวสูงสุดและมีการชดเชยผลของอุณหภูมิขณะทำการวัดด้วย เกจทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าชดเชยวงจร โดยทั่วไป เกจ 2 ตัวจะอยู่ในสภาพถูกดึงและอีก 2 ตัวอยู่ในสภาพถูกกด เมื่อน้ำหนักมากระทำ ความเครียดจะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ตัวอย่างของค่า Static Sensitivity [18]

จากกราฟข้างต้นเป็นกราฟตัวอย่างของค่า Static Sensitivity ค่า Static Sensitivity คือ ค่าอัตราส่วนระหว่าง Output ต่อ Input ซึ่งในที่นี้ค่า Output หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ออกมา และค่า Input คือ แรงที่กระทำกับตัว Load Cell ซึ่งจะต้องมา Plot กราฟอีกครั้งหลังจากการทดลอง

## 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L. Fratini G Ambrogio, R Di Lorenzo, L.Filice และF. Micari [1] ได้ศึกษาการเลือกใช้วัสดุแผ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความเครียดแข็งและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

J. Jeswiet [3] ได้ทำการศึกษาวิธีการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และได้นำระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตมาช่วยในกระบวนการทำงาน ทำให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Kathryn Jackson และJulian Allwood [6] ได้ทำการศึกษาลักษณะของกลศาสตร์ในการขึ้นรูปของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด และนำผลต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบกัน

J.Kopac และZ.Kampus [8] ได้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องกัด CNC ในกระบวนการขึ้นรูป และควบคุมเส้นการเดินทางของอุปกรณ์ที่ใช้การขึ้นรูปโดยระบบ Computer aids Manufacturing พบว่า อุปกรณ์จับยึดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องควรเปลี่ยนไปโดยมีความสัมพันธ์กันกับรูปร่างพื้นฐานที่ทำการออกแบบไว้ และแสดงถึงความสัมพันธ์ของมุมในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความลึกของชิ้นงานอีกด้วย

M.Durante, A.Formisano, A.Langella และF Mimola Capece Minutolo [9] ได้ทำการศึกษาถึงทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดด้วยการกำหนดตัวแปรในการทดสอบด้วย ความเร็วละทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ พบว่าความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์มีผลต่อค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะแผ่น

ธงชัย เฟื่องจันทร์ศิริ [15] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อค่าความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยการขึ้นรูปแผ่นทองเหลืองให้มีรูปทรงพีระมิดหัวตัดลึก 20 มิลลิเมตร และกำหนดตัวแปรในการทดสอบด้วย มุมในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่ามุมที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นมีผลต่อค่าความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานคือ เมื่อมุมในการขึ้นรูปสูงขึ้นเมื่อเทียบกับระนาบของแผ่นโลหะนั้น รูปทรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าความเที่ยงตรงสูงกว่าการขึ้นรูปด้วยมุมที่ต่ำกว่า

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยฉบับนี้ใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปร วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปได้แก่ แผ่นโลหะทองเหลือง, แผ่นโลหะทองแดง และแผ่นโลหะอลูมิเนียม มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปได้แก่มุม 30, 40 และ 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูปได้แก่ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ที่มีผลต่อลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปแผ่นโลหะและค่าความแข็งผิวหลังทำการขึ้นรูป งานวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

#### 3.1 การศึกษารวบรวมข้อมูล

ผู้ทำการวิจัยได้ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลต่างๆ จากตำรา เอกสาร วารสาร งานวิจัย วิทยานิพนธ์ ห้องสมุดและทาง Internet ที่มีเนื้อหาที่สอดคล้องและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ตลอดจนจากการขอคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัย

#### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่า กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด พบว่า ตัวแปรหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูป [7] ได้แก่ ตัวแปร ประเภทของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะการทำงานในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะทำการวิจัยโดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่นโลหะ 3 ชนิดคือ แผ่นโลหะอลูมิเนียม แผ่นโลหะทองเหลือง แผ่นโลหะทองแดง ที่ความหนา 0.6 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 3.1 โดยวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูปจะเป็นโลหะสำหรับใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11

ตารางที่ 3.1 ตารางส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป

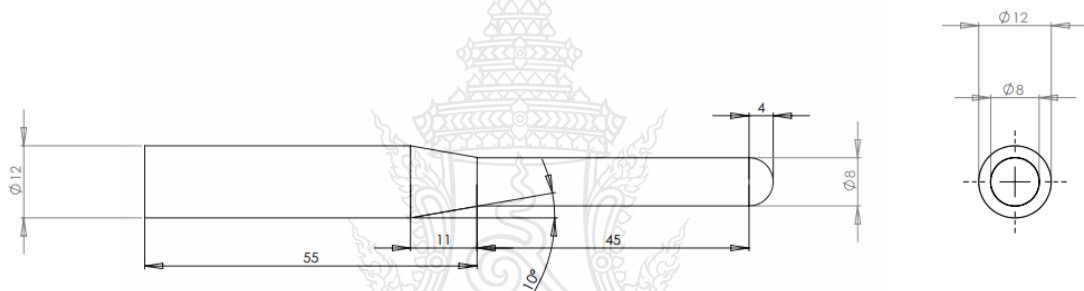
<b>Brass (C2801P 1/4H)</b>	<b>Chemical composition %</b>					
	Cu	Zn	Cl	Mg	Si	P
	61.34	38.4	0.07	0.04	0.03	0.03
	Al	Pb	Ni	Ca	Fe	-
	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	
	<b>Mechanical properties</b>					
	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)	
415.48		199.15		31.6		
<b>Copper (C1100P-1/4H)</b>	<b>Chemical composition %</b>					
	Cu	Zn	Ni	Fe	Mn	Cr
	99.94	0.018	< 0.01	< 0.01	0.012	0.011
	Sn	Pb	Si	Al		
	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.01		
	<b>Mechanical properties</b>					
	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)	
228.29		156.1		32		
<b>Aluminium (AA1100-H14)</b>	<b>Chemical composition %</b>					
	Al	Si	Fe	Cu	Ni	Ti
	99.13	0.184	0.58	0.05	0.006	0.031
	Mn	Zn	Mg	Sn	Pb	Cr
	< 0.008	< 0.017	< 0.1	0.009	0.01	< 0.001
	<b>Mechanical properties</b>					
	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)	
112.67		95.89		4		

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบแรง

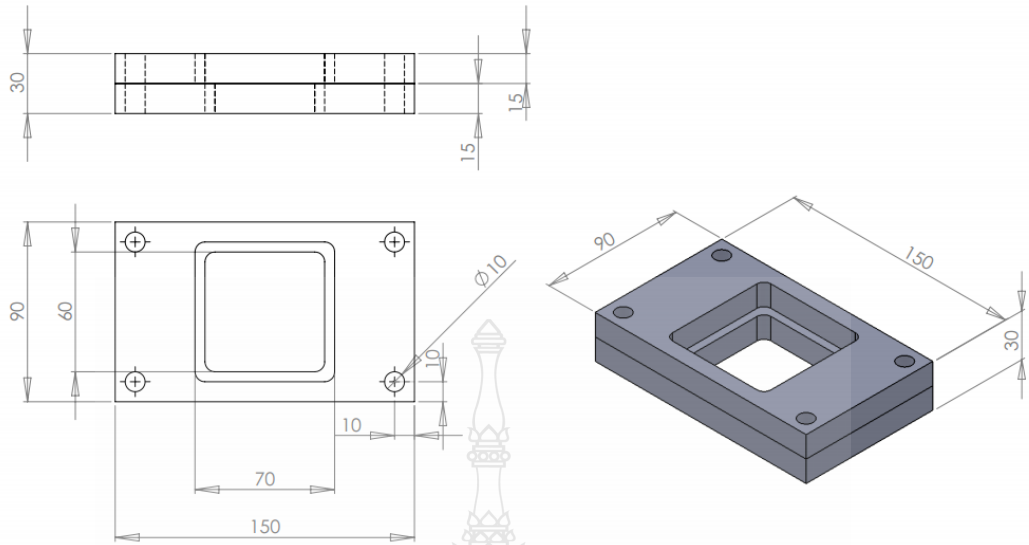
3.3.1.1 ทำการตัดแผ่น โลหะอลูมิเนียม, แผ่นโลหะทองแดง และแผ่นโลหะทองเหลืองความหนา 0.6 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาด 90 x 150 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น (Power shear) และทำการตีกริด

3.3.1.2 เตรียมวัสดุที่ใช้เป็นเครื่องมือกด ในการขึ้นรูปด้วยวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร โดยที่ปลายมีรูปร่างวงกลมด้วยเครื่องกลึง CNC Turning



ภาพที่ 3.1 เครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูป

3.3.1.3 สร้างอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่น โลหะอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้โลหะ เหล็กเกรด S50C โดยใช้เครื่องจักร CNC ในการสร้าง ให้มีขนาดกว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร



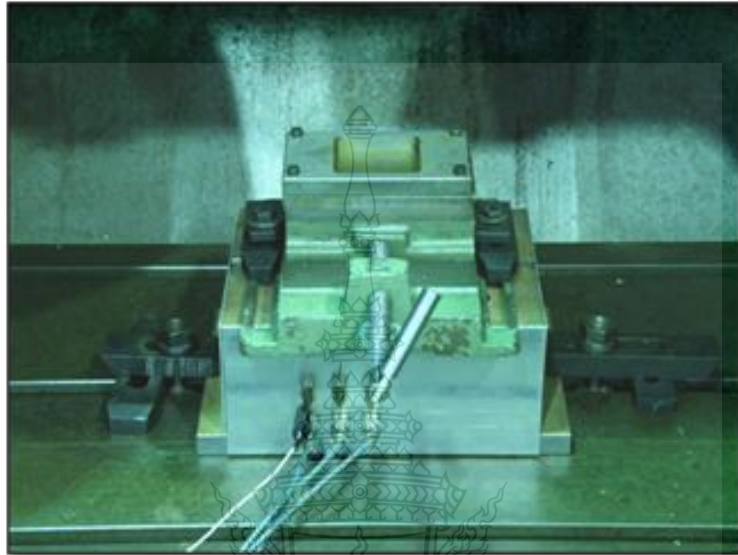
ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ

3.3.1.4 ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงเพื่อบันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป ในการวัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปนั้นจะทำการวัด โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงประเภท Load cell โดยในการติดตั้งนั้นจะทำการยึดอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะเข้ากับอุปกรณ์วัดแรง ดังภาพที่ 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป

การทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ โดยอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะจะพื้นที่ช่องว่างเพื่อให้แผ่นโลหะเปลี่ยนไปตามรูปแบบที่กำหนด และทำการบันทึกผลเข้ากับคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป



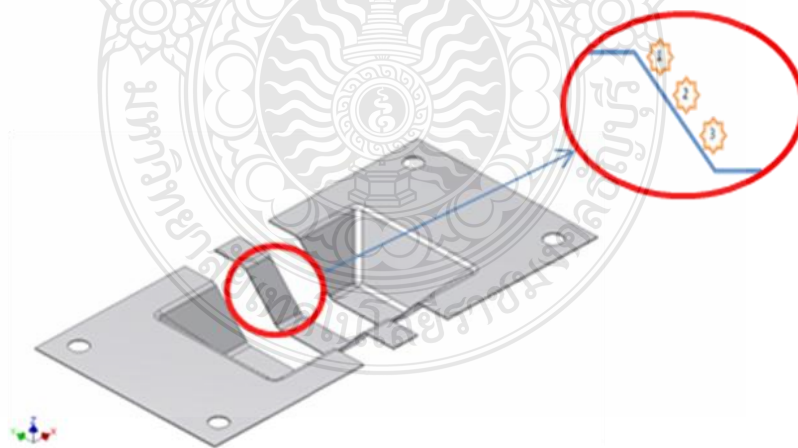
ภาพที่ 3.5 เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน

### 3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งผิว

3.3.2.1 นำชิ้นงานมาตัดโดยเครื่องตัด FINE CUT MACHINE เพื่อให้มีรูปร่างที่เหมาะสมเพื่อเตรียมสำหรับการวัดความแข็งผิว โดยจะทำการวัดค่าความแข็งผิวบริเวณจุดที่วัสดุมีการขยายตัว โดยกำหนดให้ใช้ความเร็วในการหมุนของใบตัดที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที และความเร็วเดินตัด ที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 3.6 เครื่องตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมวัดความแข็ง



ภาพที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานที่ถูกตัดเพื่อเตรียมวัดความแข็งและตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความแข็ง



3.3.2.2 นำชิ้นงานมาอัด BAKELITE ดังภาพที่ 3.8 และ 3.9 โดยใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับวัดความแข็ง



ภาพที่ 3.8 เครื่องอัด BAKELITE เพื่อเตรียมวัดความแข็ง



ภาพที่ 3.9 ลักษณะชิ้นงานที่ถูกอัดเพื่อเตรียมวัดความแข็ง

3.3.2.3 นำชิ้นงานที่อัด BAKELITE มาขัดด้วยเครื่องขัด POLISHING MACHINE ดังภาพที่ 3.10 โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 400, 800 และ 1500 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.10 เครื่องขัดชิ้นงาน

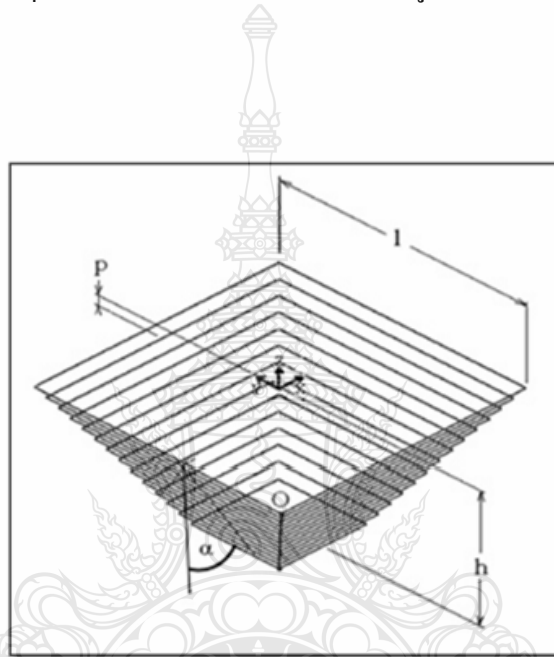
3.3.2.4 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดแล้ว มาทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง MICRO VICKERS HARNES TESTS โดยการกำหนดค่าโหลดที่ใช้ในการกด 100 กรัม เวลาในการกด 15 วินาที และทำการบันทึกค่าที่ได้



ภาพที่ 3.11 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

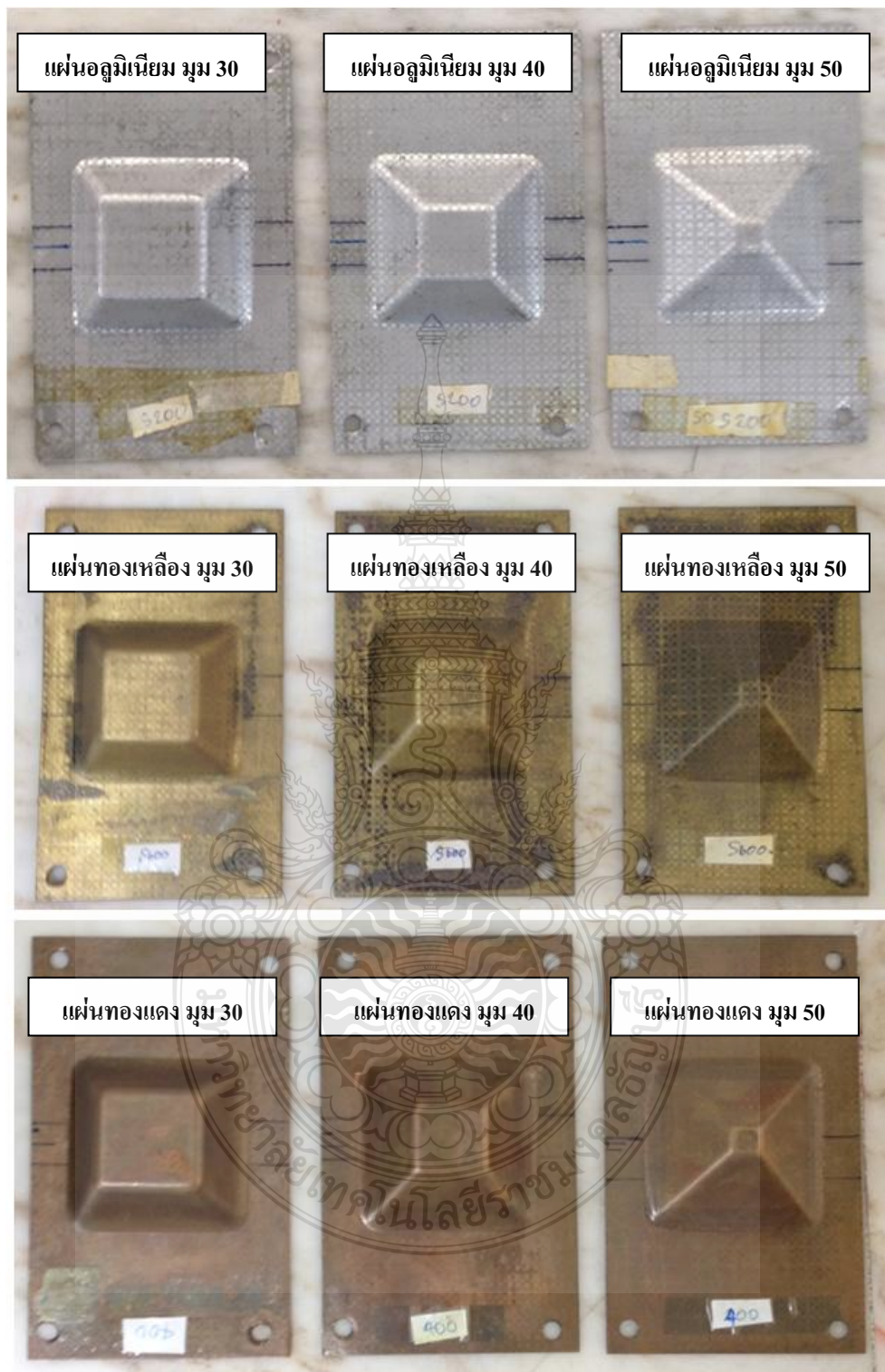
### 3.3.3 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบนี้จะใช้การขึ้นรูปทรงที่ง่ายต่อการขึ้นรูป โดยในการทดสอบจะทำการขึ้นรูปโดยมีรูปทรงแบบพีระมิดหัวตัด โดยฐานของพีระมิดเป็นสี่เหลี่ยม โดยในการทดลองจะมีกำหนดเส้นทางการเดินขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรมช่วยในการผลิต (CAM) ทำการกำหนดเส้นทางการทำงานที่เกิดขึ้น และมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป (Angle forming) ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ใช้ในการขึ้นรูป (Speed) และวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป (Material) ดังภาพที่ 3.12



Process parameter	
l (mm) (Width)	58 mm
p(mm) (Depth)	0.5 mm
h(mm) (Height)	20 mm
$\alpha$ (°)	30, 40, 50
Feed (mm/min)	200
Speed (rpm/min)	200,400,600
Material	Aluminium sheet,Brass sheet,Copper sheet

ภาพที่ 3.12 มุม เส้นทางการเดิน และค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป

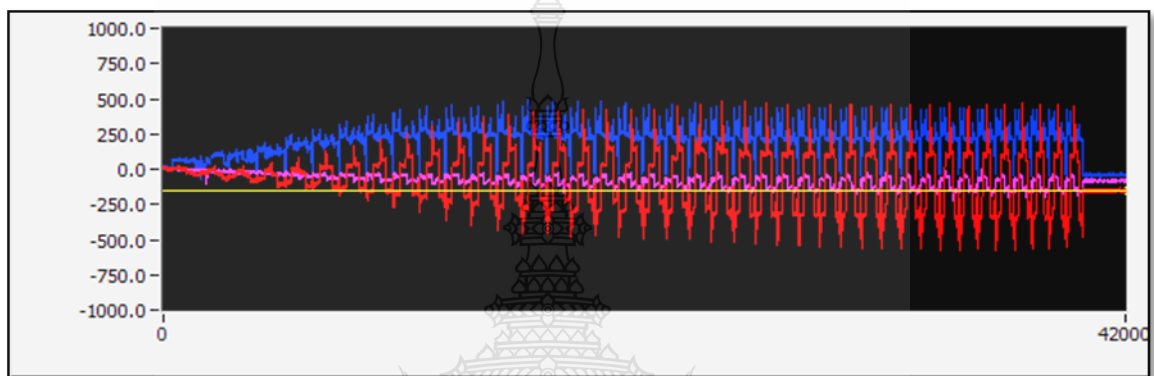


ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานหลังทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุด

### 3.4 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง

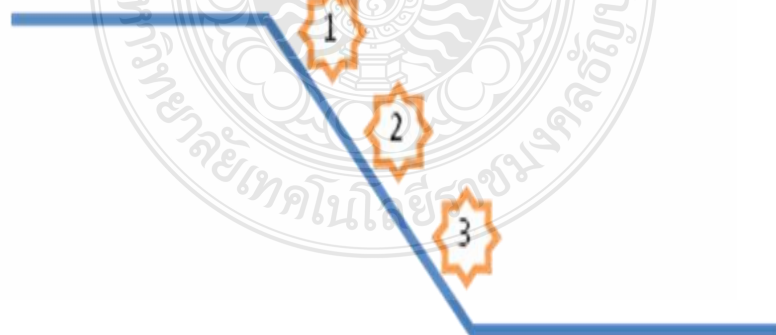
#### 3.4.1 บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป

บันทึกค่าแรงที่เกิดจากการที่เครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูป ได้กดสัมผัสพื้นผิวของแผ่นโลหะในแต่ละชั้นของการกดขึ้นรูปเพื่อให้ทราบถึงแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกน เพื่อวิเคราะห์ถึงแรงที่กระทำกับชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูป ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 หน้าจอแสดงแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป

3.4.2 วัดค่าความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ด้วยวิธีการวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ตามจุดที่กำหนด ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 ภาพหน้าตัดแสดงจุดที่ทำการวัดค่าความแข็งหลังการขึ้นรูป

### 3.5 การเปรียบเทียบสรุปผลการทดลอง

3.5.1 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุด โดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงแบบพีระมิดหัวตัดลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุแผ่นโลหะอะลูมิเนียม, แผ่นโลหะทองเหลือง และแผ่นโลหะทองแดง ที่มุม 30, 40 และ 50 องศา และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ที่ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที

3.5.2 เปรียบเทียบความแข็งผิวบริเวณจุดที่วัสดุมีการขยายตัวหลังการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงแบบพีระมิดหัวตัดลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุแผ่นโลหะอะลูมิเนียม, แผ่นโลหะทองเหลือง และแผ่นโลหะทองแดง ที่มุม 30, 40 และ 50 องศา และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ที่ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

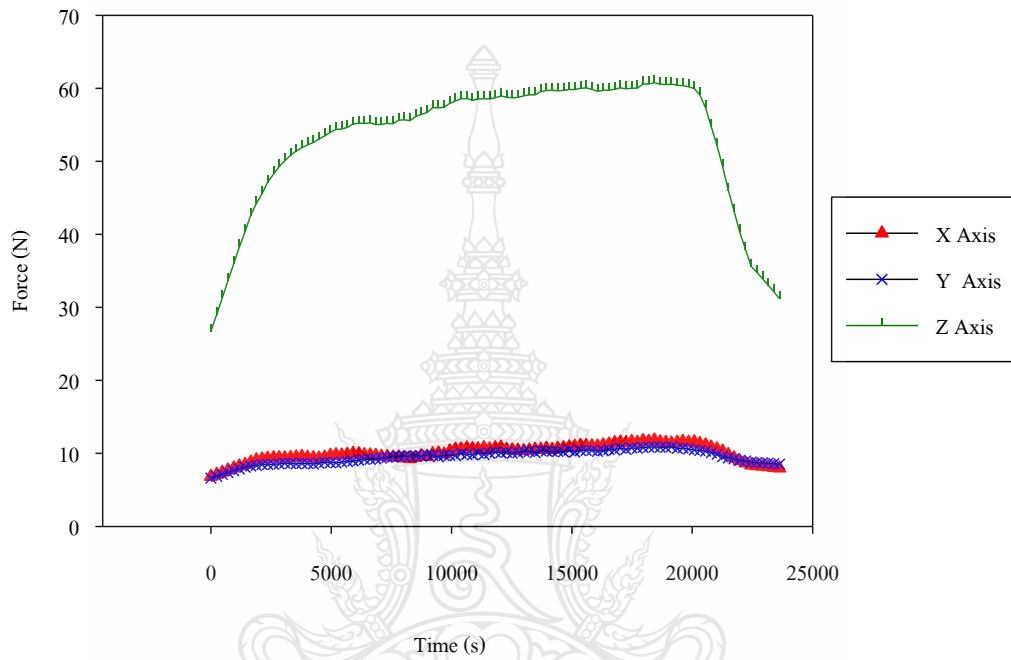
ผลการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อแรงขณะทำการขึ้นรูป และค่าความแข็งผิวหลังทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยมีตัวแปรเพื่อประกอบการศึกษาในครั้งนี้ 3 ตัวแปร คือ วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปได้แก่ แผ่นโลหะทองเหลือง, แผ่นโลหะทองแดง และ แผ่นโลหะอลูมิเนียม มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปได้แก่มุม 30, 40 และ 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูปได้แก่ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ซึ่งตัวแปรทั้งสามนั้นส่งผลกระทบต่อแรงขณะทำการขึ้นและค่าความแข็งผิวของแผ่นโลหะหลังการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด หลังจากนั้นจึงนำผลการทดลองด้วยตัวแปรที่แตกต่างกันโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดมาเปรียบเทียบกันเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของตัวแปร ซึ่งผลการทดลองที่แสดงในบทนี้ จะเป็นผลการทดลองที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร

#### 4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรที่มีผลต่อแรงขณะทำการขึ้นรูป

มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เนื่องมาจากมุมในการขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ใช้ในการขึ้นรูป ส่งผลกระทบต่อให้เกิดแรงสูงสุดซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 อิทธิพลที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X, Y และ Z ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียม

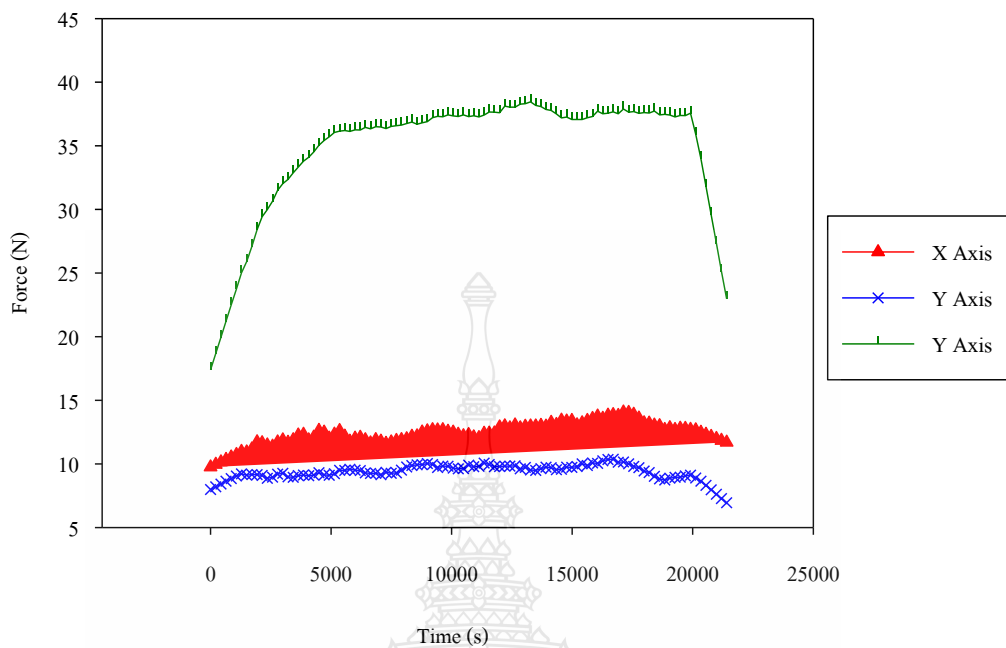
1) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที

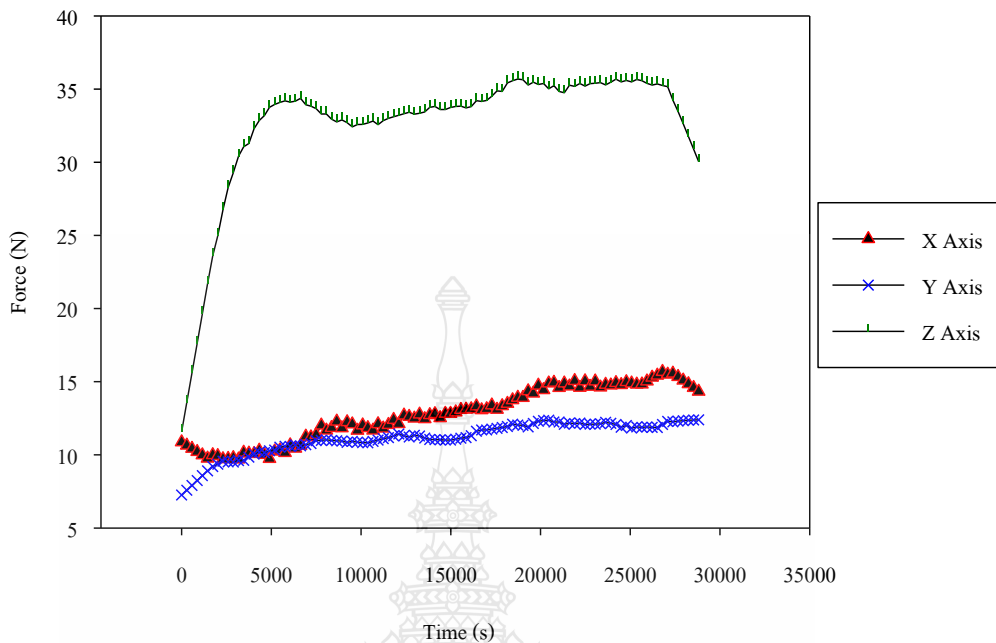
จากภาพที่ 4.1 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 60.76 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 11.79 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 10.90 นิวตัน





ภาพที่ 4.2 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

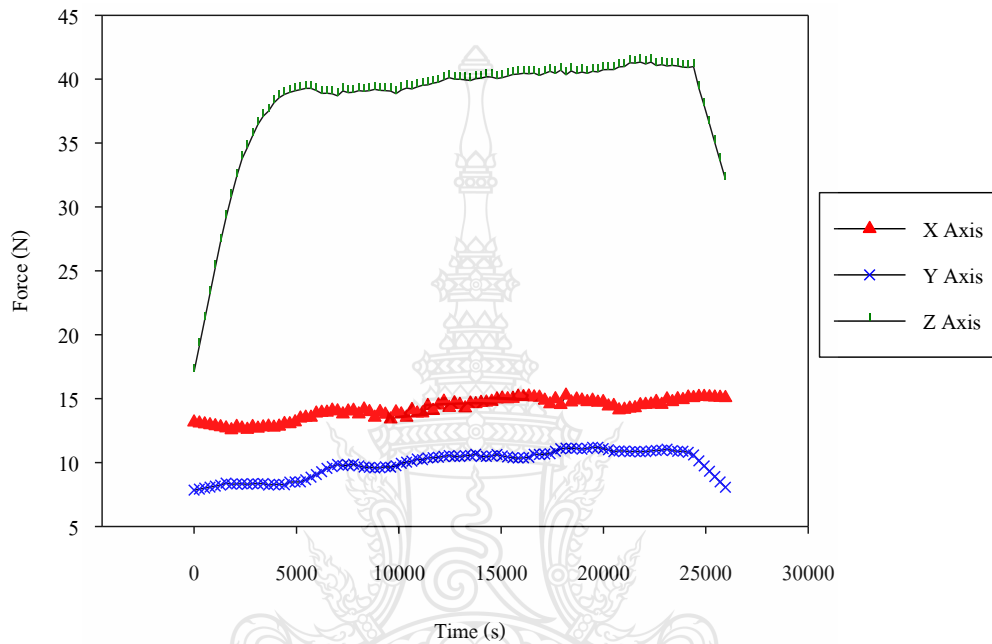
จากภาพที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียม เป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 38.45 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 14.06 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 10.36 นิวตัน



ภาพที่ 4.3 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 600 รอบต่อนาที

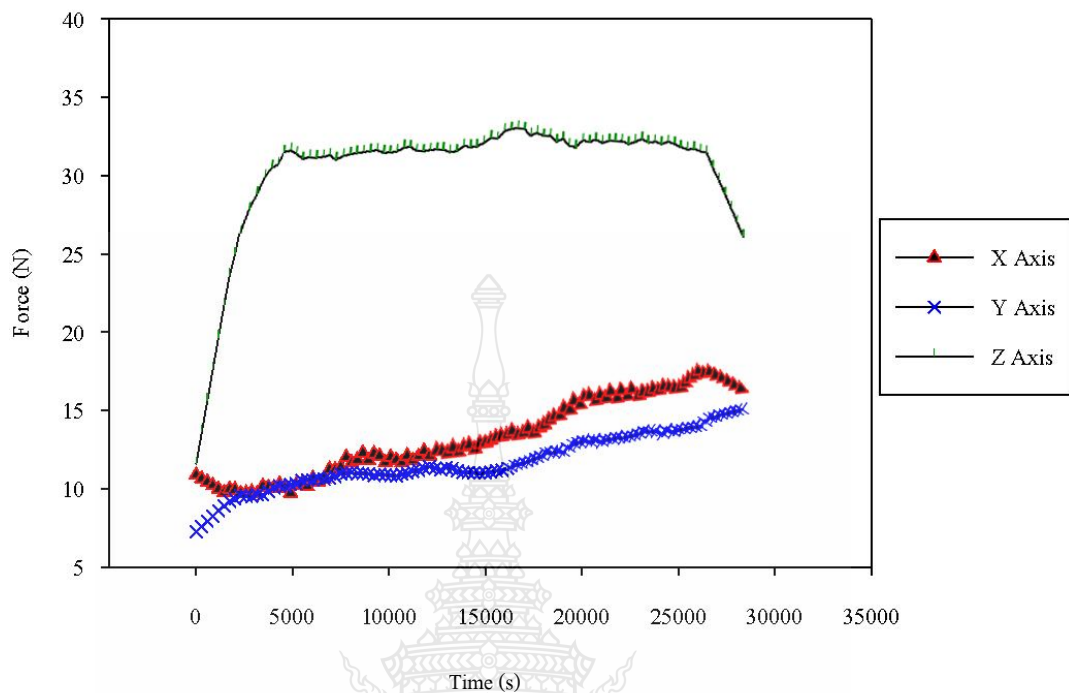
จากภาพที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 35.69 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 15.68 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่น เท่ากับ 12.39 นิวตัน

2) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



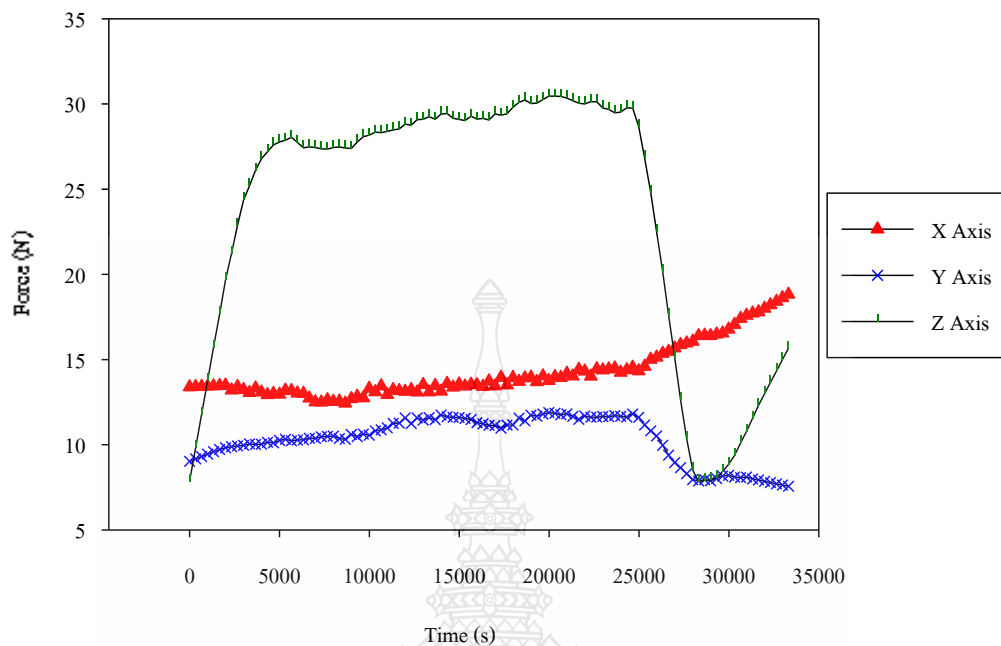
ภาพที่ 4.4 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.4 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน , Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 41.32 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 15.25 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 11.19 นิวตัน



ภาพที่ 4.5 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของ เครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

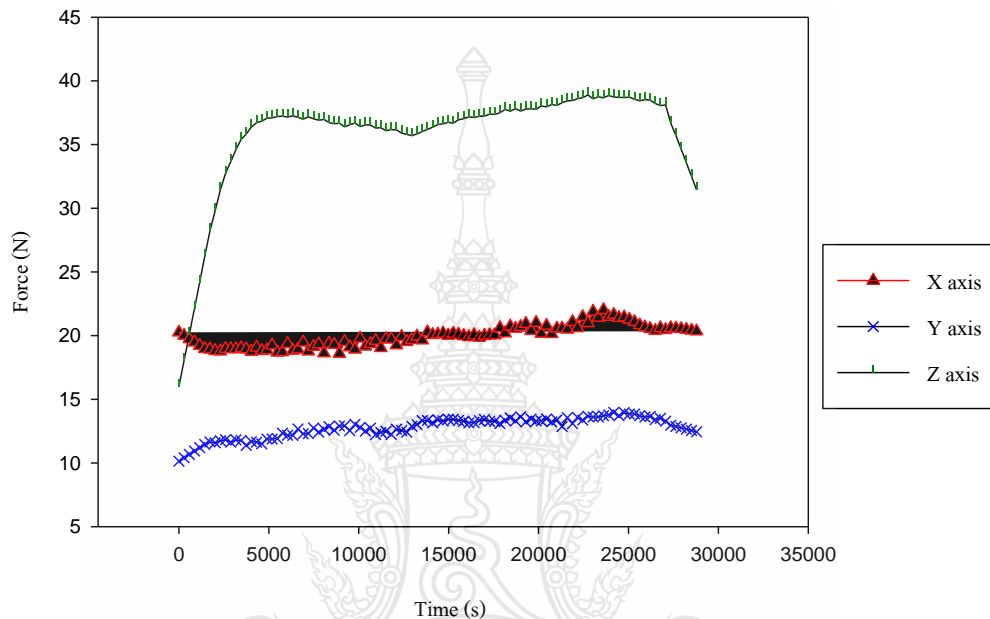
จากภาพที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรง พีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่า มีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นใน แนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 34.14 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุด ที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 17.46 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุด ต่ำสุดกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่น เท่ากับ 14.39 นิวตัน



ภาพที่ 4.6 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที

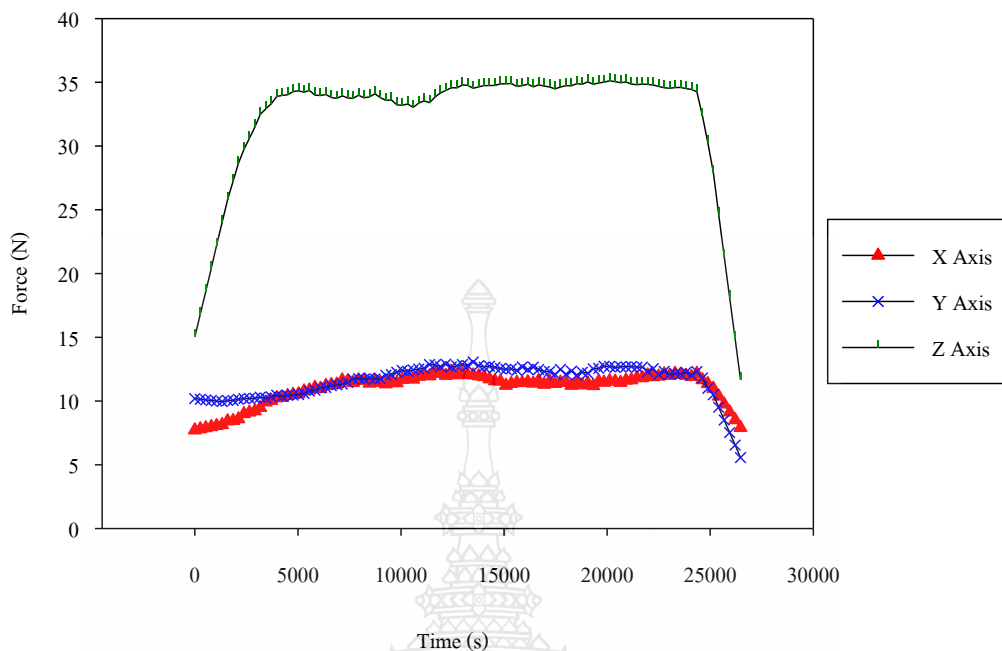
จากภาพที่ 4.6 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรงพีระมิดตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 30.46 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 18.82 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 11.88 นิวตัน

3) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



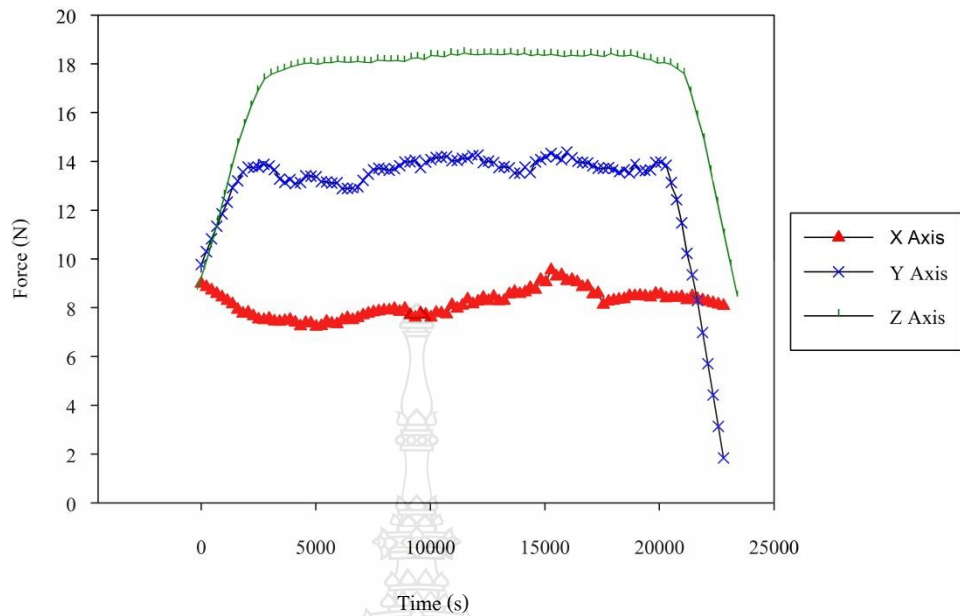
ภาพที่ 4.7 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.7 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 38.89 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 22.01 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่น เท่ากับ 13.96 นิวตัน



ภาพที่ 4.8 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 400 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.8 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 35.11 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 13.05 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 12.32 นิวตัน



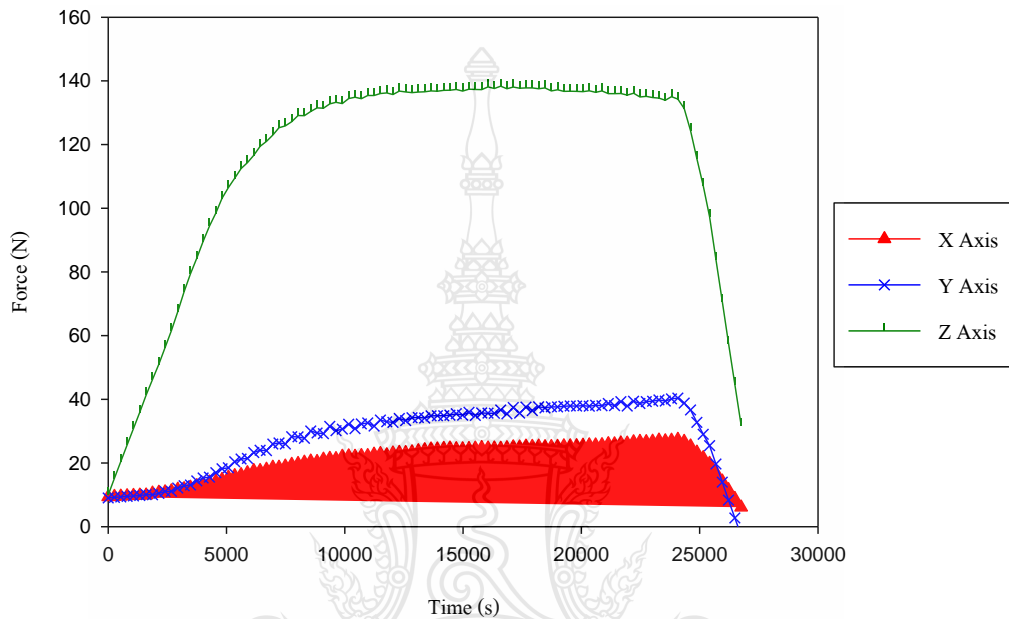
ภาพที่ 4.9 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 600 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.9 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 18.02 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 14.38 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 9.54 นิวตัน

4.1.2 อิทธิพลของมุมที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X แกน Y และแกน Z ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลือง

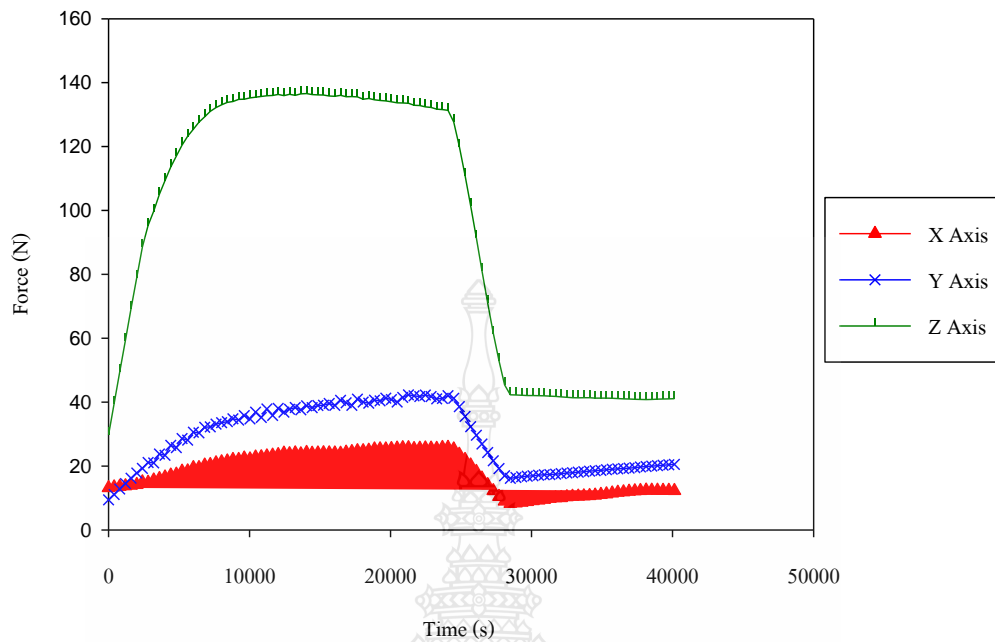


1) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และและความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



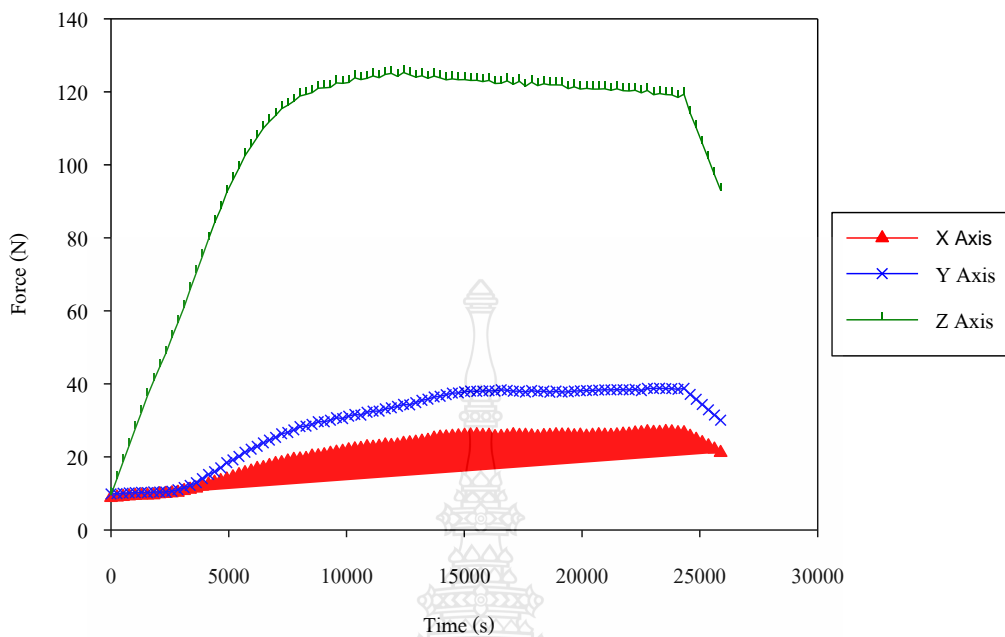
ภาพที่ 4.10 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.10 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 138.35 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 40.38 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 27.35 นิวตัน



ภาพที่ 4.11 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองเหลืองด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของ เครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

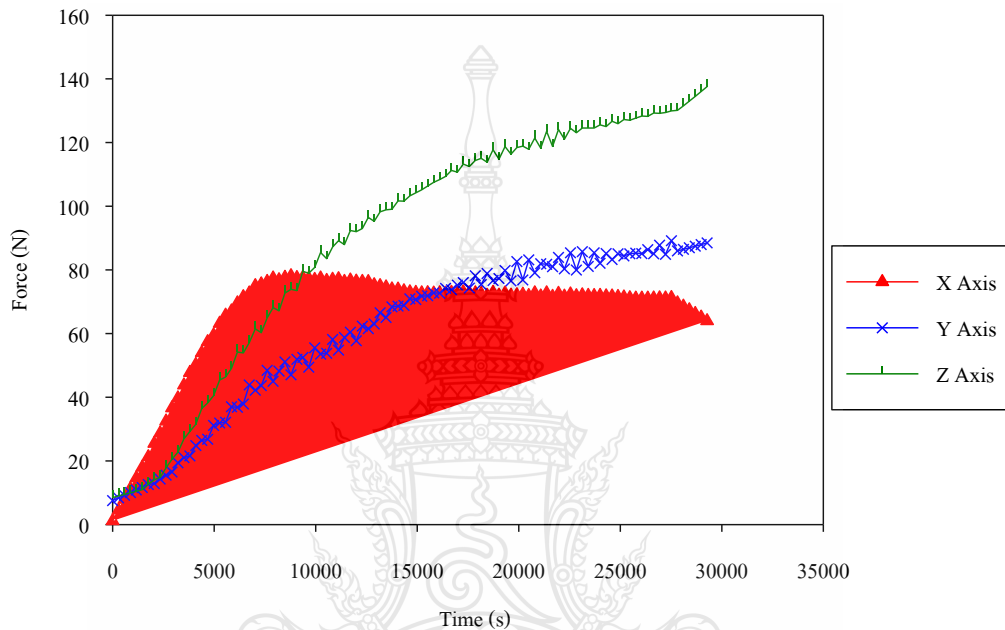
จากภาพที่ 4.11 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรง พีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่า มีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นใน แนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 136.60 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุด ที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 42.27 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุด ต่ำสุดกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 25.78 นิวตัน



ภาพที่ 4.12 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที

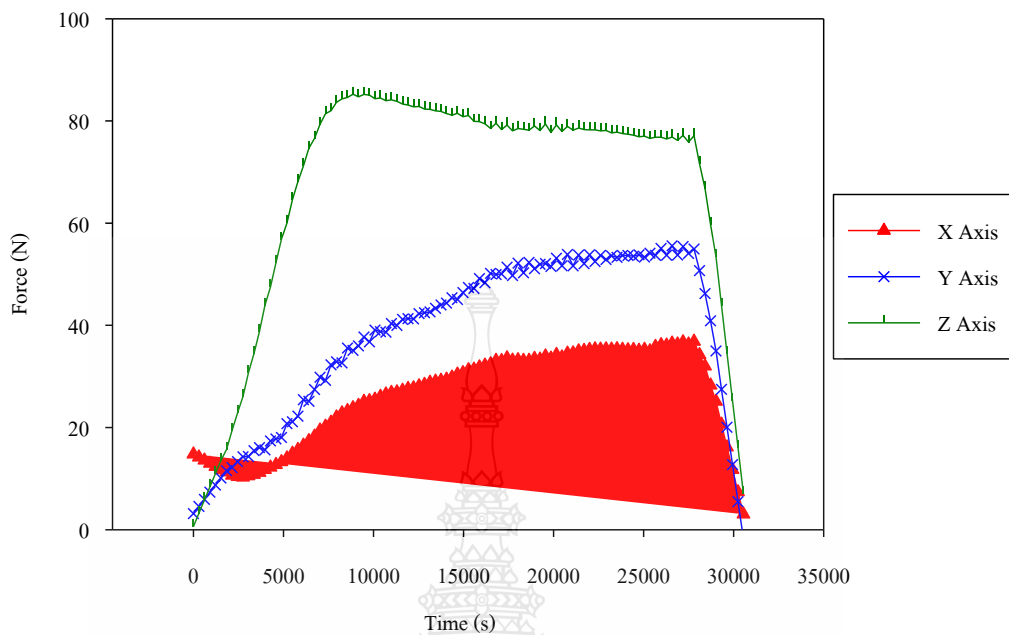
จากภาพที่ 4.12 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 125.28 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 38.84 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 26.88 นิวตัน

2) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



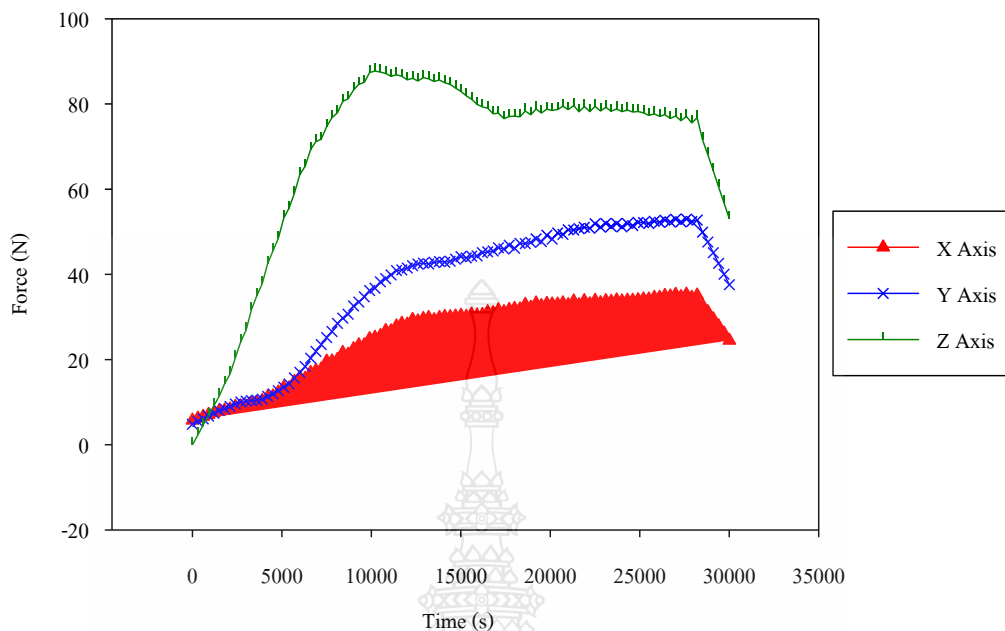
ภาพที่ 4.13 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.13 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 137.59 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 89.16 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 78.08 นิวตัน



ภาพที่ 4.14 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

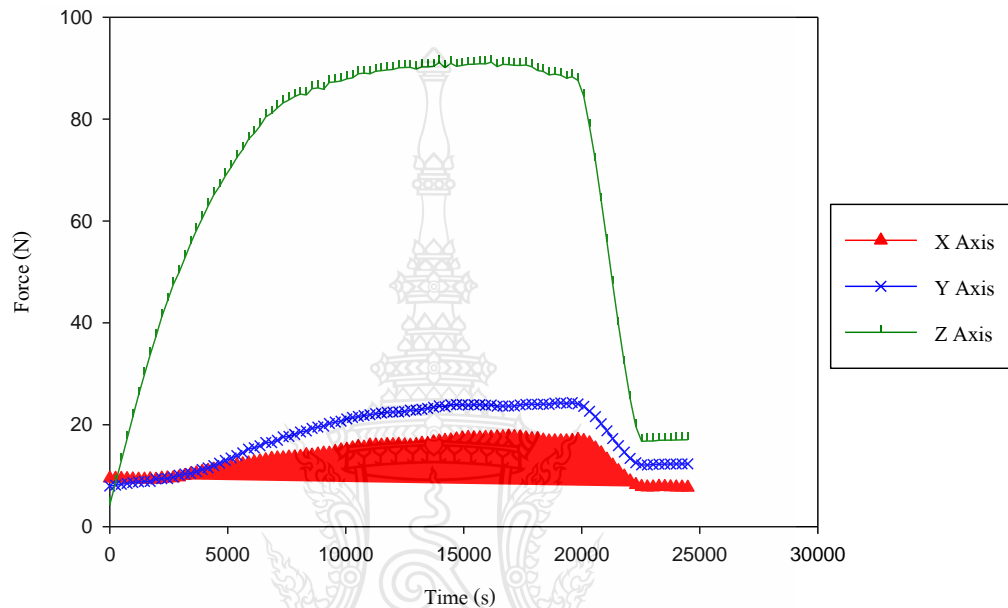
จากภาพที่ 4.14 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 85.23 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 55.56 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำสุดกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 36.85 นิวตัน



ภาพที่ 4.15 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที

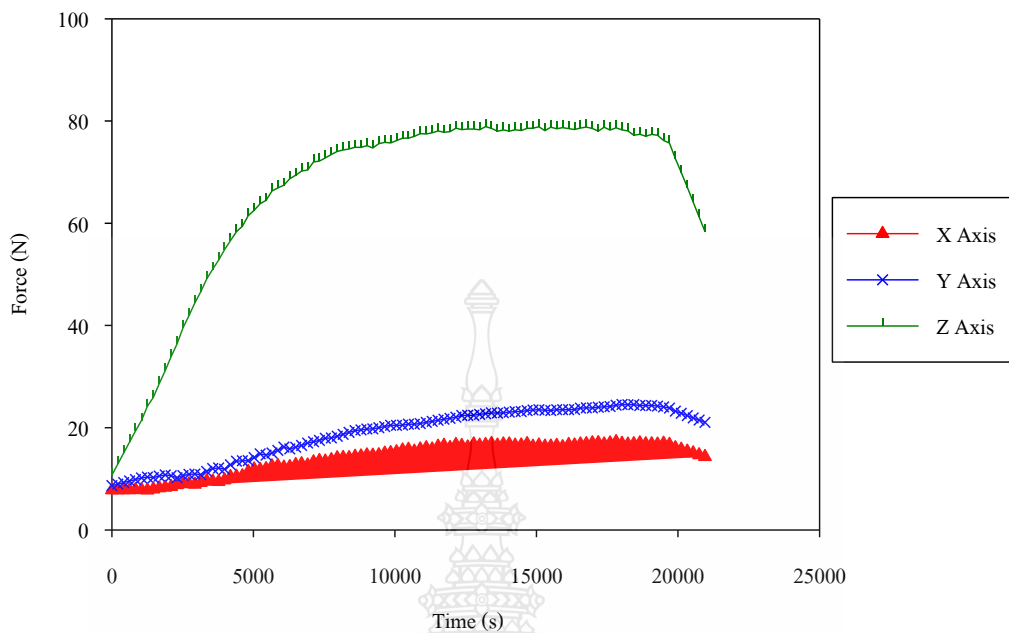
จากภาพที่ 4.15 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 87.71 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 52.95 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 35.28 นิวตัน

3) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.16 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที

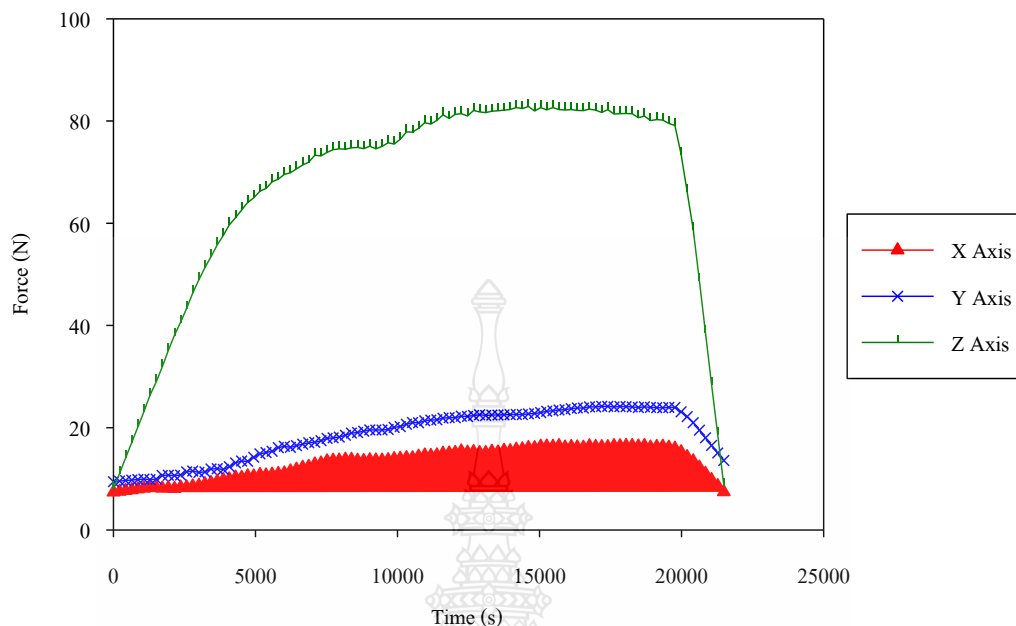
จากภาพที่ 4.16 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 91.19 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 24.33 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 17.73 นิวตัน



ภาพที่ 4.17 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.17 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 78.89 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 24.54 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำสุดกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 17.29 นิวตัน



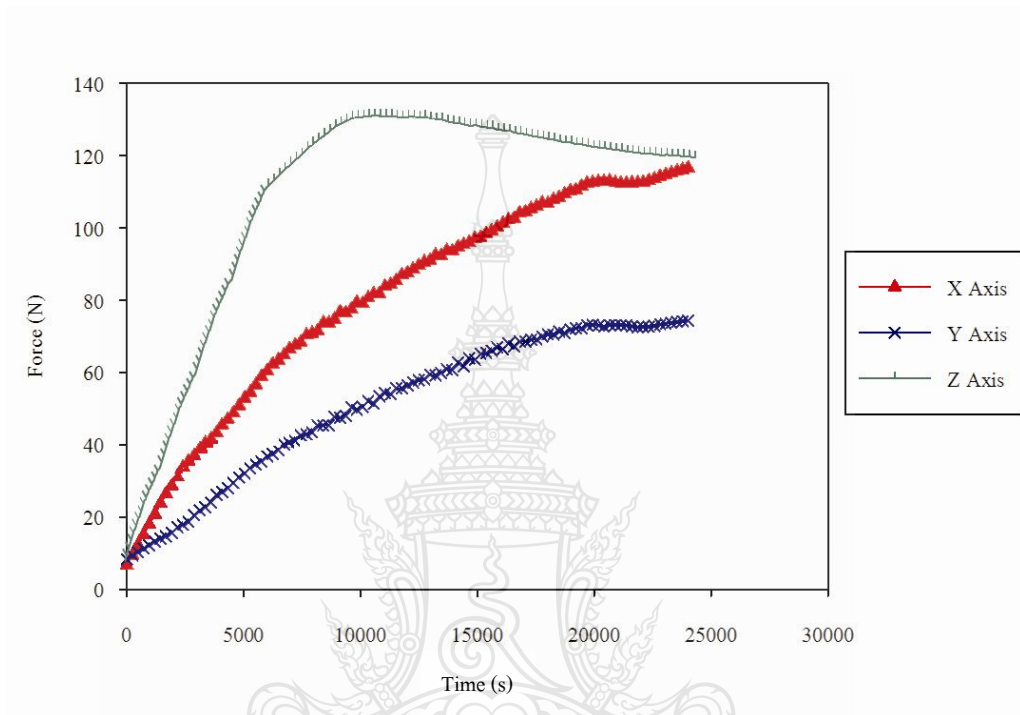


ภาพที่ 4.18 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.18 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 82.83 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 24.16 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 16.46 นิวตัน

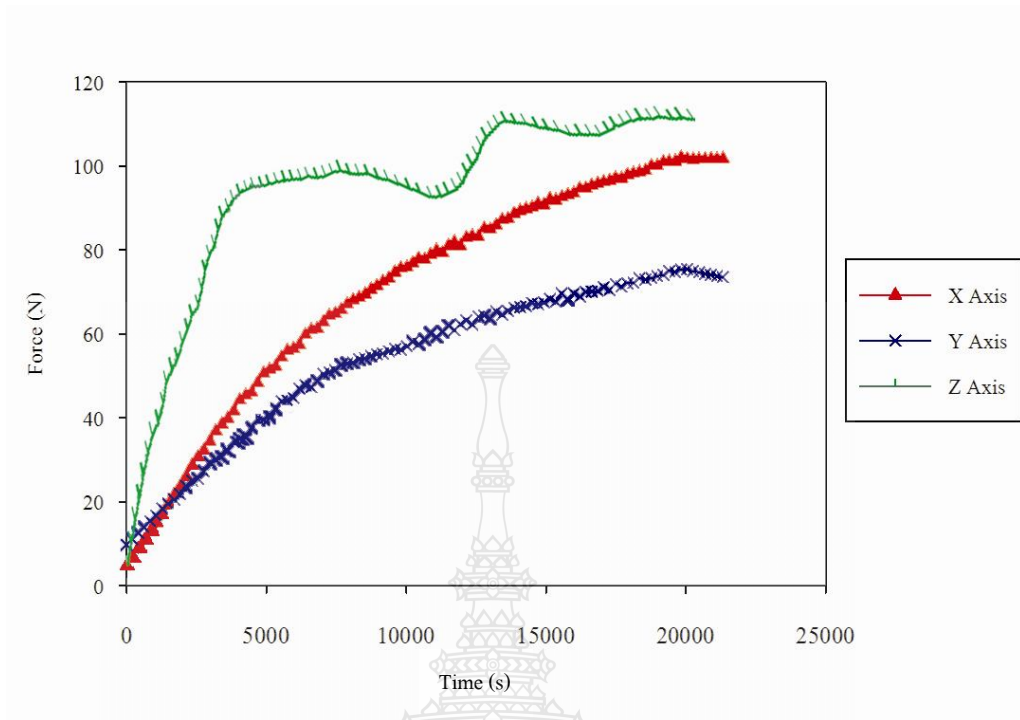
4.1.3 อิทธิพลของมุมที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X แกน Y และแกน Z ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดง

1) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



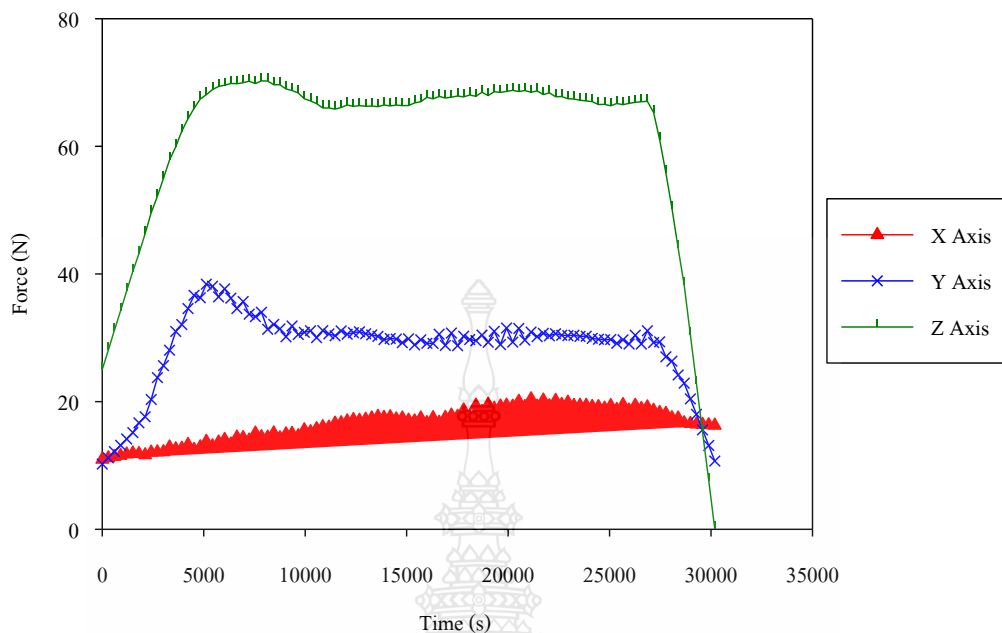
ภาพที่ 4.19 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.19 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 134.28 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 118.38 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 69.17 นิวตัน



ภาพที่ 4.20 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

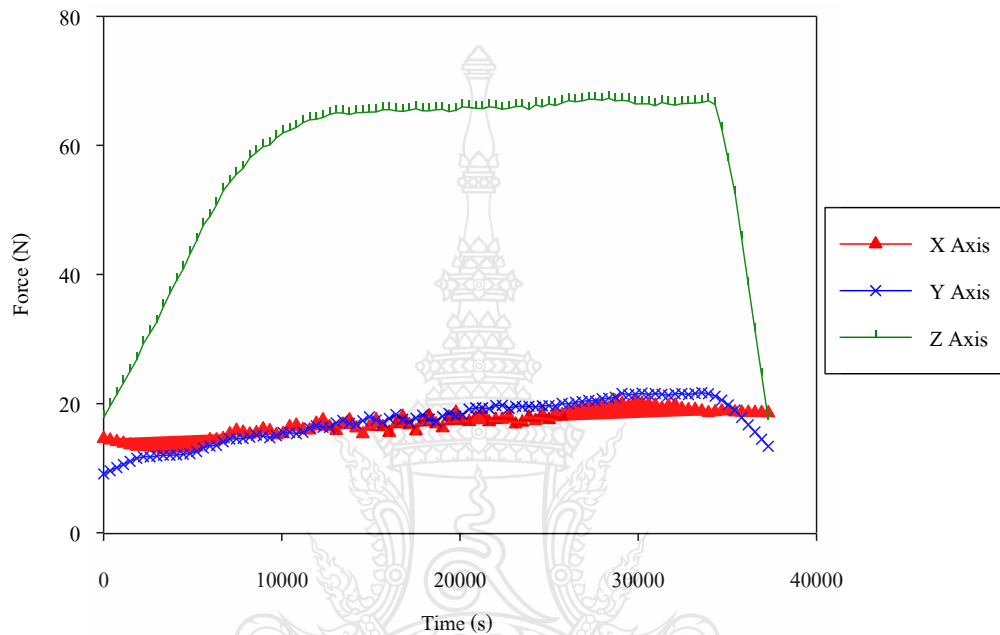
จากภาพที่ 4.20 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 112.02 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 97.48 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 69.06 นิวตัน



ภาพที่ 4.21 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที

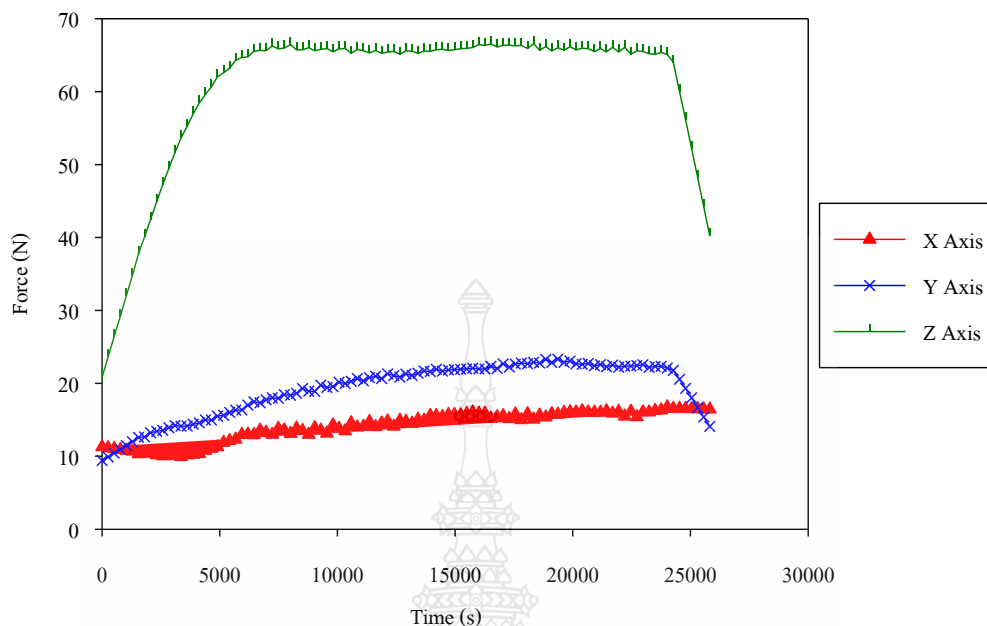
จากภาพที่ 4.21 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 70.26 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 38.40 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 20.40 นิวตัน

2) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



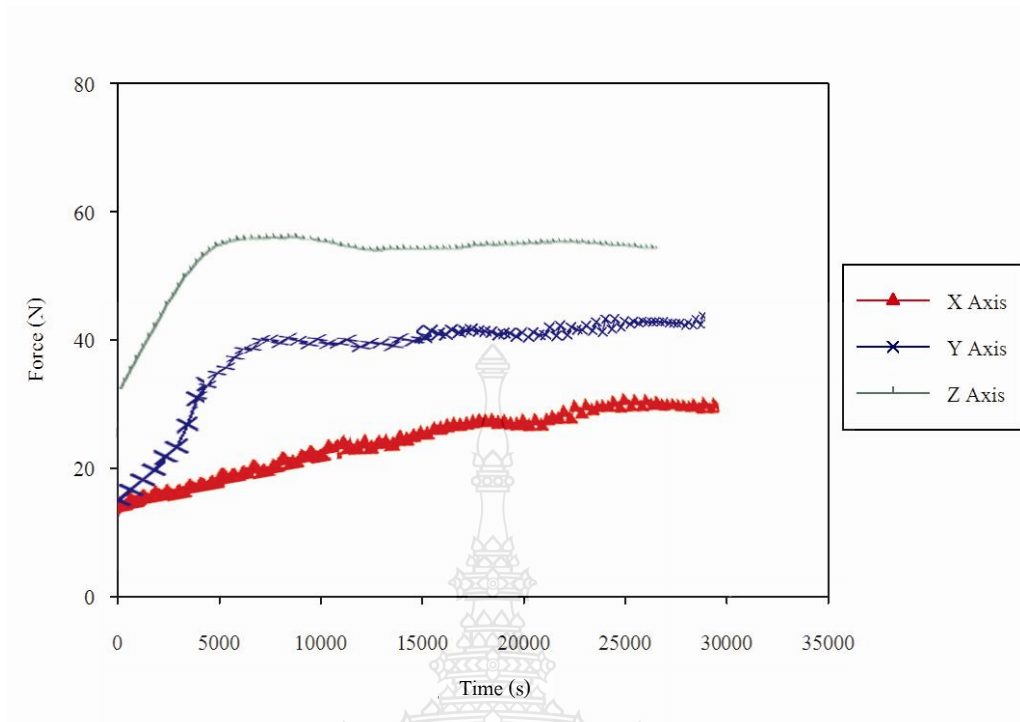
ภาพที่ 4.22 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.22 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกัด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 67.29 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 21.67 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 20.35 นิวตัน



ภาพที่ 4.23 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

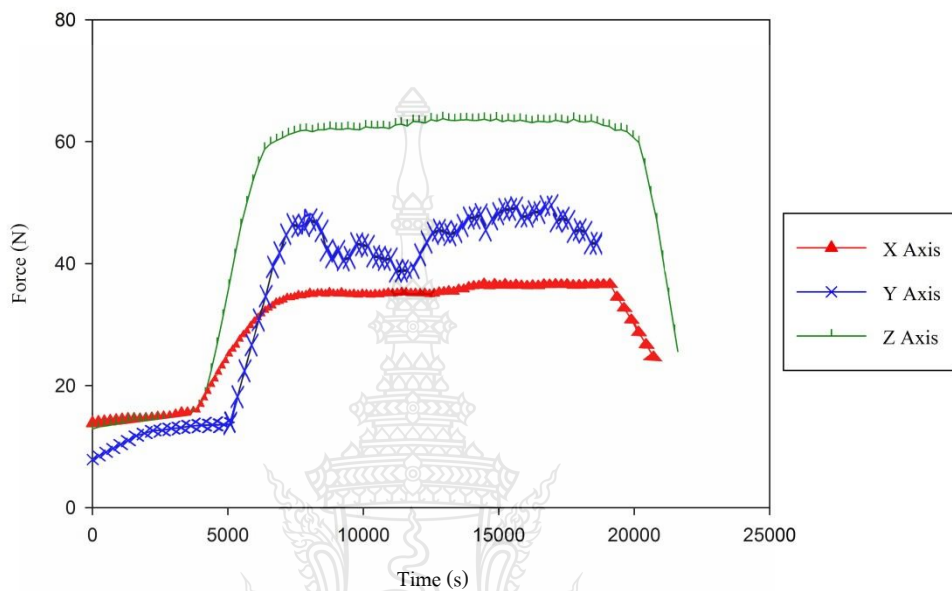
จากภาพที่ 4.23 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 66.57 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 23.31 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 16.74 นิวตัน



ภาพที่ 4.24 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 40 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.24 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 40 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 57.27 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 42.53 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 37.25 นิวตัน

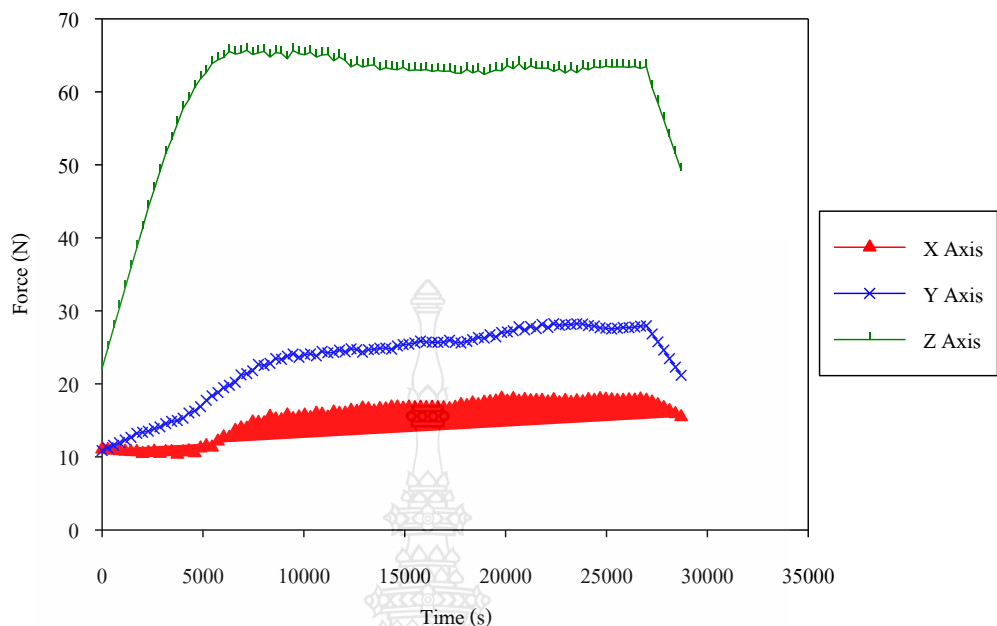
3) การลากขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกดที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.25 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที

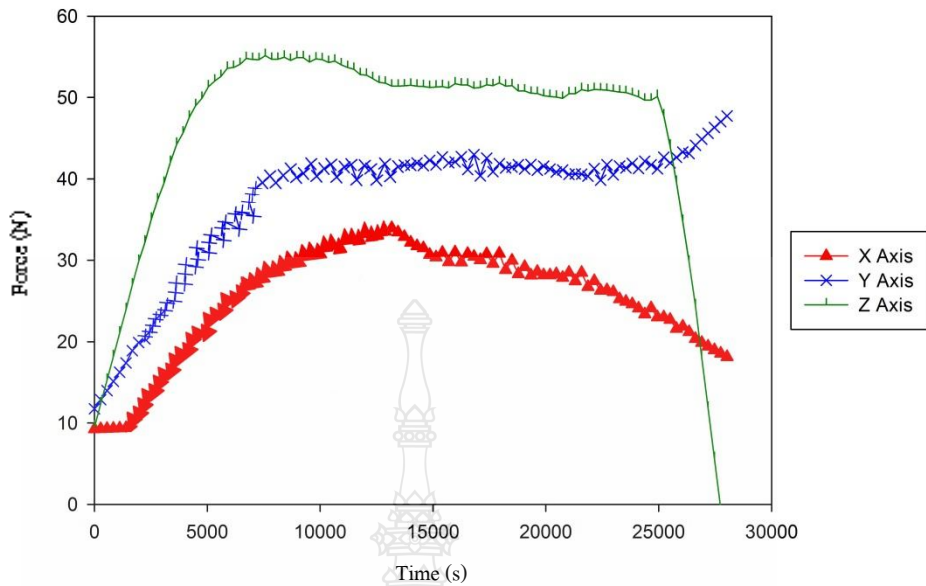
จากภาพที่ 4.25 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 63.78 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 44.16 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 37.43 นิวตัน





ภาพที่ 4.26 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที

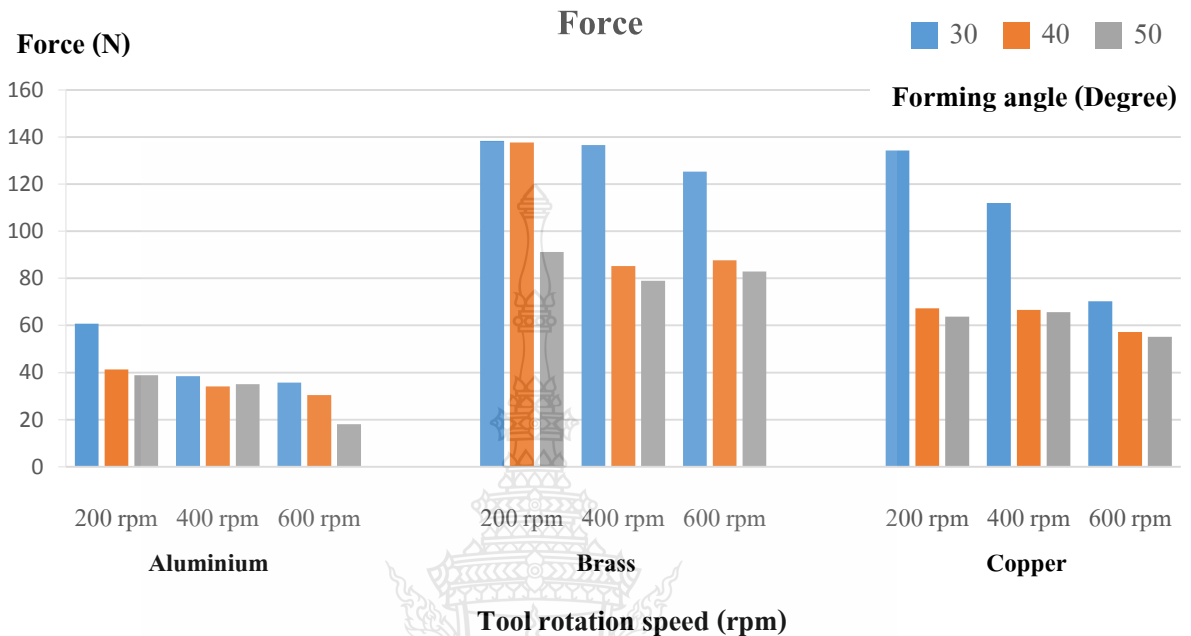
จากภาพที่ 4.26 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงเป็นรูปทรงพีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที พบว่ามีผลทำให้ แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 65.69 นิวตัน ค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 28.24 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 18.01 นิวตัน



ภาพที่ 4.27 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงด้วยมุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของ เครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 4.27 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองแดงเป็นรูปทรง พีระมิดหัวตัดความลึก 20 มิลลิเมตร ด้วยมุม 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกด 200 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที พบว่า มีผลทำให้แรง ที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปในแนวแกน X, Y และ Z เพิ่มขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นใน แนวแกน Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ 55.14 นิวตัน ค่าแรงที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าแรงสูงสุด ที่เกิดขึ้นมีค่ารองลงมาเท่ากับ 47.72 นิวตัน และค่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X มีค่าแรงที่เกิดขึ้นสูงสุด ต่ำสุดกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอื่นเท่ากับ 33.96 นิวตัน

#### 4.1.2 วิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรที่มีผลต่อแรงขณะทำการขึ้นรูป



ภาพที่ 4.28 ค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นของวัสดุขณะทำการขึ้นรูป

1) วิเคราะห์ห้อทธิพลของตัวแปรมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้น โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด การขึ้นรูปแผ่น โลหะด้วยตัวแปรมุมที่แตกต่างกันคือ 30, 40 และ 50 องศา โดยใช้แผ่นโลหะอลูมิเนียม แผ่นโลหะทองเหลือง และแผ่นโลหะทองแดงในการขึ้นรูป ด้วยความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่กำหนดคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที พบว่า การใช้มุมในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันในการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดนั้น มีผลทำให้แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปมีค่าแรงสูงสุดแตกต่างกัน โดยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดในการขึ้นรูปจะเกิดที่มุม 30 องศา รองลงมาคือมุม 40 องศา และต่ำสุดคือมุม 50 องศา และเมื่อทำการเปรียบเทียบถึงแรงสูงสุดของทั้งสามแนวแกน ที่เกิดขึ้นพบว่า มุมในการขึ้นรูปที่น้อยส่งผลกระทบต่อให้เกิดค่าแรงที่วัดได้ในขณะทำการขึ้นรูปสูงกว่าการใช้มุมในการขึ้นรูปที่มาก ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของแรงที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงไปของมุมนั้น เนื่องมาจาก

เมื่อทำการขึ้นรูปด้วยมุมที่แคบลงนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบจากการจำลองด้วยภาพ 2 มิติ ขณะที่เครื่องมือกดสัมผัสกับแผ่นโลหะพบว่า พื้นที่ในการสัมผัสของทุลกับแผ่นโลหะก็เพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Jeswiet1 [4] ในปี 2007 ซึ่งทำการศึกษาทดลองถึงความสัมพันธ์ของมุมที่ใช้ในขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียมกับแรงที่เกิดขึ้นระหว่างทำการขึ้นรูปขึ้นงานซึ่งพบว่า เมื่อทำการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียมที่มมน้อยลงเมื่อเทียบกับแนวในการกดของเครื่องมือกดแรงที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้น โดยการขึ้นรูปที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด คือการขึ้นรูปแผ่นทองเหลืองโดยใช้มุมในการขึ้นรูป 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที เท่ากับ 138.45 นิวตัน

2) วิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้น โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

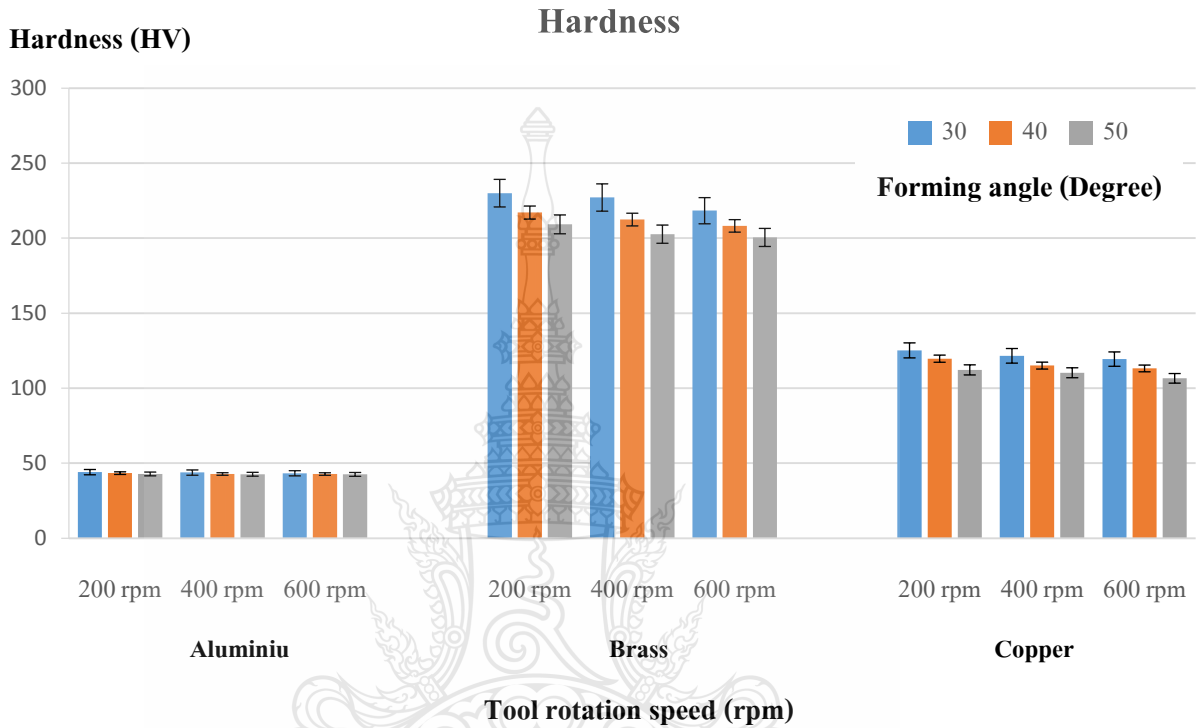
การขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยตัวแปรความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกัน คือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที โดยใช้แผ่นโลหะอลูมิเนียม แผ่นโลหะทองเหลือง และแผ่นโลหะทองแดงในการขึ้นรูป ด้วยมุมที่กำหนดคือ 30, 40 และ 50 องศา พบว่า ความเร็วรอบของเครื่องมือกดที่แตกต่างกันในการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุดนั้น มีผลทำให้แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปมีค่าแรงสูงสุดที่ต่างกัน โดยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดในการขึ้นรูปจะเกิดที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที รองลงมาคือความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 400 รอบต่อนาที และต่ำสุดคือความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที และเมื่อทำการเปรียบเทียบถึงแรงสูงสุดของทั้งสามแนวแกนที่เกิดขึ้นก็พบว่าความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ต่ำ จะส่งผลกระทบให้เกิดค่าแรงที่วัดได้ในขณะทำการขึ้นรูปสูงกว่าการใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่สูง ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า สาเหตุที่การขึ้นรูปด้วยการใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่สูงก่อให้เกิดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ เนื่องจากในการขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปถูกเสียดสีจากการหมุนของเครื่องมือกดจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในบริเวณพื้นผิวของวัสดุ ส่งผลให้วัสดุนั้นมีความสามารถในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดแรงในการขึ้นรูปที่น้อยลงจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M.Durante, [9] ในปี 2009 ซึ่งทำการทดลองถึงความสัมพันธ์ของความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่มีต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยทำการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม Al 3003-O ด้วยความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกันแล้วทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป พบว่าอุณหภูมิของแผ่นอลูมิเนียมที่เกิดขึ้นนั้นมีความแตกต่างกันคือ เมื่อทำการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกดที่สูง อุณหภูมิที่วัดได้

มีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยการขึ้นรูปที่ทำให้เกิดแรงต่ำสุด คือการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม ด้วยมุมในการขึ้นรูป 50 องศา โดยใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 600 รอบต่อนาที เท่ากับ 18.02 นิวตัน

3) วิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้น โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

การขึ้นรูปด้วยตัวแปรวัสดุที่แตกต่างกันคือ แผ่นโลหะอลูมิเนียม แผ่นโลหะทองเหลือง และแผ่นโลหะทองแดง โดยใช้มุมในการขึ้นรูปที่ 30, 40 และ 50 องศา ด้วยและความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกันคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที พบว่า การใช้วัสดุในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันในการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุด นั้นมีผลทำให้แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปมีค่าแรงสูงสุดที่แตกต่างกันแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดในการขึ้นรูปนั้นเกิดที่ วัสดุแผ่นโลหะทองเหลือง รองลงมาคือ แผ่นโลหะทองแดง และต่ำสุดคือ แผ่นโลหะอลูมิเนียม ซึ่งจากการวิเคราะห์ โดยเปรียบเทียบกับค่าสมบัติทางกลของแผ่นโลหะแต่ละชนิดพบว่า ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ที่เป็นกระบวนการที่ใช้การกดและปั่นรีดวัสดุให้โลหะเปลี่ยนรูปไปอย่างถาวรนั้นวัสดุที่มีความทนต่อแรงดึงสูง เป็นวัสดุที่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Fratini [1] ในปี 2007 ซึ่งทำการทดลองถึงอิทธิพลของคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยทำการขึ้นรูปแผ่นโลหะประเภทต่างๆ แล้ววัดขีดจำกัดการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น พบว่า วัสดุที่มีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำ เป็นวัสดุที่ใช้แรงในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดที่ต่ำกว่าการใช้วัสดุที่มีค่าความทนต่อแรงดึงสูง และจากการทดลองวัสดุที่ใช้แรงในการขึ้นรูปสูงสุด คือการขึ้นรูปแผ่นทองเหลืองที่มุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที มีค่าแรงสูงสุดเท่ากับ 138.45 นิวตัน รองลงมาคือการขึ้นรูปแผ่นทองแดงที่มุม 30 โดยใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที มีค่าแรงสูงสุดเท่ากับ 134.28 นิวตัน และการขึ้นรูปที่ใช้แรงสูงคือน้อยที่สุดคือการขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่มุม 30 องศา โดยความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่ 200 รอบต่อนาที มีค่าแรงสูงสุดเท่ากับ 63.00 นิวตัน

## 4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งผิวที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป



ภาพที่ 4.29 ค่าความแข็งผิวที่เกิดขึ้นของวัสดุหลังทำการขึ้นรูป

พบว่า ขณะการกดขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดจะเกิดความร้อน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อน พลังงานกลคือแรงที่หัวเครื่องมือกดกระทำกับแผ่น โลหะ ขณะที่เครื่องมือกดกดลงบนแผ่นโลหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่งผลให้แผ่นโลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้น [19]

1) วิเคราะห์อิทธิพลของมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความแข็งผิวที่เกิดขึ้น

การขึ้นรูปด้วยมุมที่แตกต่างกัน มีผลให้ความแข็งที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปด้วยมุมที่แตกต่างกันคือมุม 30, 40 และ 50 องศา มีค่าความแข็งแตกต่างกัน โดยค่าความแข็งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นโลหะที่มุม 30 องศา มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือมุม 40 และ 50 องศา ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปที่แคบทำให้วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเกิดการยึดตัว

มากกว่ามุมที่กว้าง ดังภาพที่ 4.30 และเมื่อการยึดตัวของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปมากขึ้น ค่าความแข็งแรงก็เพิ่มขึ้นโดยการขึ้นรูปที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ การขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลือง ที่มุมในการขึ้นรูป 30 องศา ด้วยความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด 200 รอบต่อนาที เท่ากับ 230 HV

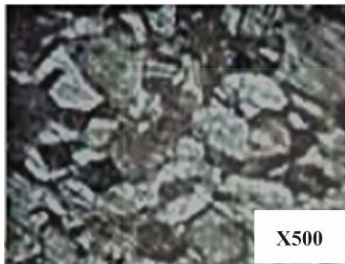


ภาพที่ 4.30 การยึดตัวของแผ่น โลหะอลูมิเนียมหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือ 200 รอบต่อนาที ที่มุม 30, 40 และ 50 องศา

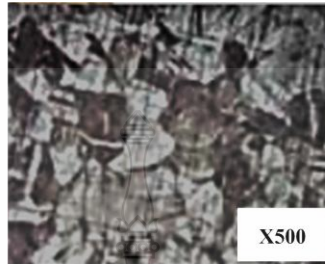
2) วิเคราะห์อิทธิพลของความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด ที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความแข็งแรงที่เกิดขึ้น

การขึ้นรูปด้วยความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปด้วยความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกันคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที มีค่าความแข็งแรงแตกต่างกัน โดยค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นโลหะ ที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกด 200 รอบต่อนาที จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ 400 และ 600 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างเครื่องมือกดกับแผ่น โลหะ โดยการขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบของเครื่องมือกดที่สูง ทำให้แผ่นโลหะมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่าการขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบของเครื่องมือกดที่ต่ำ เนื่องจากเมื่อเครื่องมือกดหมุนด้วยความเร็วที่สูงขึ้นแผ่น โลหะก็จะถูกเสียดสีจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น [9] ดังนั้นการใช้ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกดที่สูงขึ้นก็ทำให้แผ่นโลหะ มีความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นและทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดความเครียดแข็งแรงน้อยลงและทำให้ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นน้อยลงด้วยเช่นกัน ภาพที่ 4.31 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของแผ่นโลหะทองเหลืองที่มุม 30 องศา ที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกัน โดยการขึ้นรูปที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่น้อยจะมีการจัดเรียงตัวของเกรนที่อยู่ใกล้กันอยู่กันอย่างเป็นระเบียบและมีขนาดเกรนที่สม่ำเสมอมากกว่า

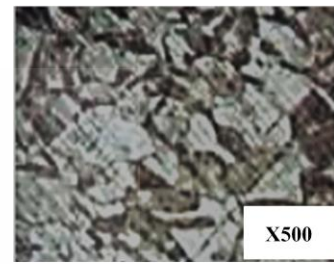
ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นด้วยการขึ้นรูปที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่สูง ทำให้การขึ้นรูปที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่น้อยมีความแข็งแรงมากกว่าการขึ้นรูปที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่สูง



ก) ความเร็วรอบในการหมุนของ  
เครื่องมือกัด 200 รอบต่อนาที



ข) ความเร็วรอบในการหมุนของ  
เครื่องมือกัด 400 รอบต่อนาที



ค) ความเร็วรอบในการหมุนของ  
เครื่องมือกัด 600 รอบต่อนาที

**ภาพที่ 4.31** โครงสร้างของแผ่น โลหะทองเหลืองหลังการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา ที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที

3) วิเคราะห์อิทธิพลของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความแข็งผิวที่เกิดขึ้น

การขึ้นรูปด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน มีผลให้ความแข็งผิวที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปด้วยวัสดุที่แตกต่างกันคือ แผ่นโลหะทองเหลือง แผ่นโลหะทองแดง และแผ่นโลหะอลูมิเนียม มีค่าความแข็งผิวแตกต่างกัน โดยค่าความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นโลหะทองเหลืองจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ แผ่นโลหะทองแดง และ แผ่นโลหะอลูมิเนียม ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบกับค่าสมบัติทางกลของแผ่นโลหะแต่ละชนิดพบว่า ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุด ที่เป็นกระบวนการที่ใช้การกดและป้อนรีดวัสดุให้โลหะเปลี่ยนรูปไปอย่างถาวรนั้น วัสดุที่มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงจะมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ต่ำ ทำให้เมื่อทำการขึ้นรูปโดยการทำให้เสียรูปจากการกดป้อน วัสดุที่มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงก็เกิดความเค้นตกค้างขึ้นที่พื้นผิวมากกว่าวัสดุที่มีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำ



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่กำหนดคือ วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันคือ แผ่นโลหะอลูมิเนียม, แผ่นโลหะทองเหลือง และแผ่นโลหะทองแดง มุมในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันคือ 30, 40 และ 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่แตกต่างกันคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อวินาที ซึ่งมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปและความแข็งผิวหลังการขึ้นรูป สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปการวิจัย

5.1.1 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปมากขึ้นแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะน้อยลง และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ใช้ในการขึ้นรูปมากขึ้นแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะน้อยลง ในส่วนของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยวัสดุที่ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยที่สุดคือแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่มุม 50 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 600 รอบต่อวินาที โดยให้ค่าแรงเท่ากับ 18.02 นิวตัน

5.1.2 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยลงค่าความแข็งผิวหลังการขึ้นรูปจะมากขึ้น และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่น้อยลงค่าความแข็งผิวหลังการขึ้นรูปจะมากขึ้น ในส่วนของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยวัสดุที่ให้ค่าความแข็งผิวมากที่สุดหลังการขึ้นรูปคือ วัสดุแผ่นโลหะทองเหลืองที่มุม 30 องศา ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัด 200 รอบต่อวินาที โดยให้ค่าความแข็งผิวเท่ากับ 230 HV

## 5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.2.1 โลหะแผ่นชนิดเดียวกันแต่อาจจะมีการผลิตคนละช่วงการผลิตโดยใช้คุณภาพของวัตถุดิบในการผลิตและมาตรฐานการผลิตที่แตกต่างกันหรืออาจจะเกิดจากการผลิตจากผู้ผลิต คนละบริษัทกันซึ่งอาจมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตไม่เหมือนกัน ซึ่งอาจทำให้สารฝังใน (Inclusion) คุณสมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกลที่มีในโลหะแผ่นแตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้ค่า ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง เช่นแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป, และความแข็งแรง ที่ถูกวัดอาจแตกต่างกันบ้าง

5.2.2 หลังการวัดค่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป โดยก่อนจะทำการทดลองด้วยตัวแปรต่อไปควรเว้นระยะเวลาในการทดลองในตัวแปรถัดไป เพื่อให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงแบบ สเตรนเกจซึ่งเป็นสเตรนเกจแบบวงแหวน ที่ได้รับแรงกระทำจากการวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปชิ้นงานในแต่ละแนวแกน จนเกิดการความเครียดขึ้นกับวงแหวนได้ คลายความเครียดกับสภาพปกติ เพื่อให้การวัดค่าแรงในตัวแปรต่อไปได้ค่าที่มีความเที่ยงตรง

## 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

5.3.1 ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรแนวแกนที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดที่แตกต่างจากการใช้เครื่องจักร CNC แบบสามแกน

5.3.2 ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของกลไกของการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูป กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

5.3.3 ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรของรูปทรงที่ใช้ในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน เช่น การขึ้นรูปเป็นรูปทรงกลม การขึ้นรูปในรูปทรงสามเหลี่ยม และการขึ้นรูปโดยใช้การรูปทรงที่มีความซับซ้อนที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

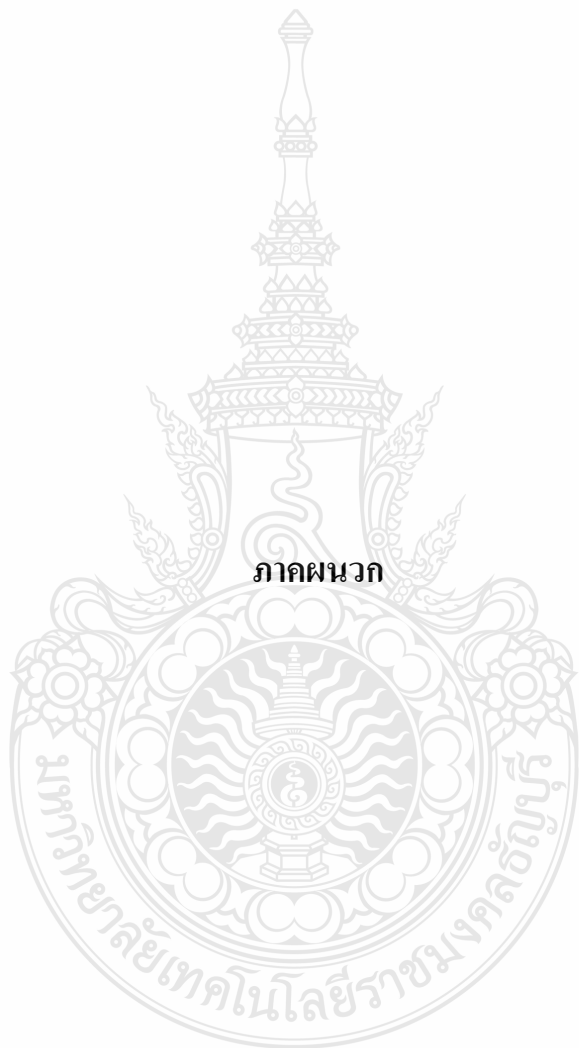
5.3.4 ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดด้วยการเคลื่อนที่ของทูลในแนวตั้ง จากการเปลี่ยนแปลงความลึกของในการกดของทูลในการขึ้นรูปวัสดุทดสอบ

5.3.5 ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ระเบียบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

## บรรณานุกรม

- [1] L. Fratini G Ambrogio,R Di Lorenzo, L.Filice, F. Micari, Influence of mechanical properties of the sheet material in single point incremental forming ,CRIP Ann.53 (1) (2004) 207-210
- [2] Leszak, E Patent US3342051A1, Published 1967-01-19 Apparatus and Process for incremental Dieless Forming
- [3] J.Jeswiet,rapid proto-typing with incremental single point forming, CAD/CAM Comput.Graphics 15 (2000) 177-183
- [4] Schmoeckel, D. Development in Automation Flexibilization and Control of Forming Machinery Annals of CIRP vol 40/2/1992:615
- [5] P.A.F.Martin , N.Bay , M Skjoedt , M.B Silva, Theory of single point incremental forming, CRIP Ann. Manufacturing Technology 57 (2008) 247-252
- [6] Kathryn Jackson ,Julian Allwood, The mechanic of incremental sheet forming, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) II58-II74
- [7] F.Micari, G.Ambrogio, L.Filice, Shape and Dimention accuracy in Single Point Incremental Forming: State of art and Future trends, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 390-395
- [8] J.Kopac, Z.Kampus, Incremental sheet metal forming on CNC machine-tool, Journal of Materials Processing Technology 162-163(2005)
- [9] M.Durante, A.Formisano, A.Langella, F Mimola Capece Minutolo, The influence of tool rotation on an incremental forming process, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 4621-4626
- [10] João Luís Padrão de Brito Câmara, Single Point Incremental Forming, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica ,Instituto Superior Tecnico ,2009
- [11] Meiller, M., Pfestorts, M. and Geiger, M., The use of dry film lubricants in aluminium sheet metal forming, Journal of wear, Vol.255 (7-12), 2003, pp.1455-1462
- [12] มอก.977-2551 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่
- [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

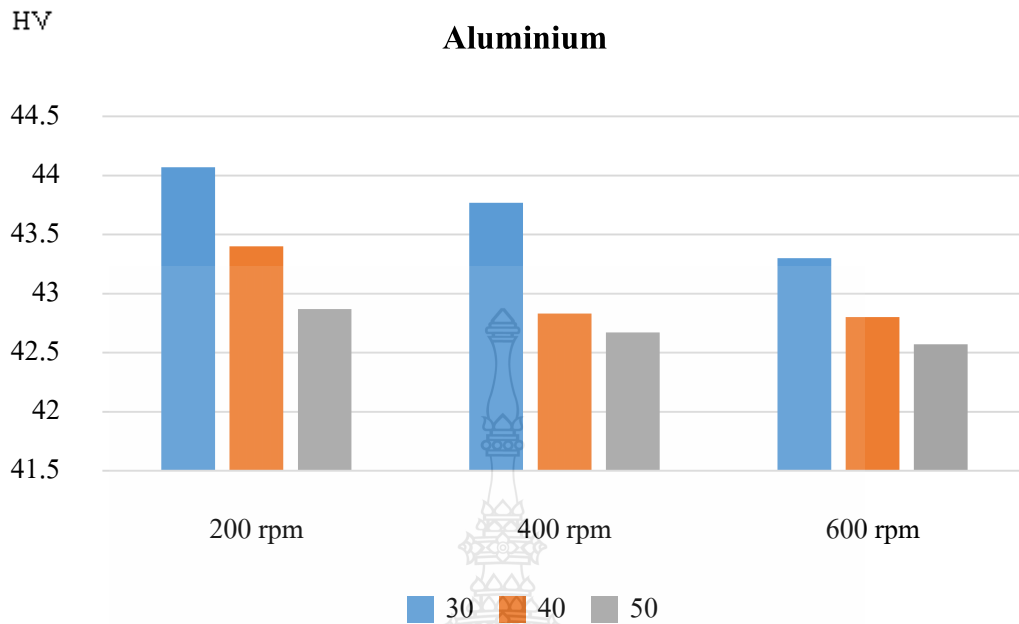
- [14] สวัสดิ์ โสคามุข, การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549, จังหวัดนครราชสีมา, 2549
- [15] ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี, ศิริชัย ต่อสกุล 2553, “การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะผสมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยเครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน”, การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน ครั้งที่ 7 (The 7th KU-KPS Conference), 7-8 ธันวาคม, กำแพงแสน , นครปฐม.
- [16] “มาตรฐานและสมบัติของเหล็กกล้าที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม”, สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (IRON AND STEEL INSTITUTE OF THAILAND), กันยายน 2554,
- [17] การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing), [Online]  
[http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-7.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-7.pdf)
- [18] Sedat Karabay, Analysis of drill dynamometer with octagonal ring type transducers for monitoring of cutting forces in drilling and allied process , Journal of Materials and Design 28 673-685(2007)
- [19] กระบวนการรีดเย็นลดขนาดความหนาเหล็กกล้าไร้สนิม, [Online]  
<http://www.siamstainless.com/?p=1195>
- [20] Joost Duflou, Yasemin Tunckol ,Alex Szekeres, Paul Vanherck ,Experimental study on force measurement for single point incremental forming , Journal of Materials Processing Technology 189 (2007) 65-72



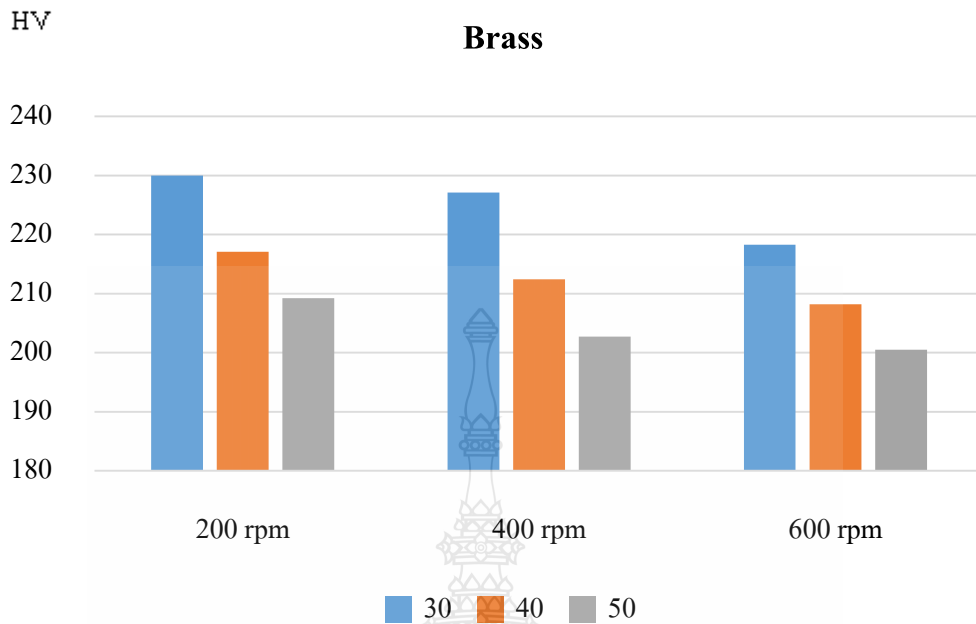


ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

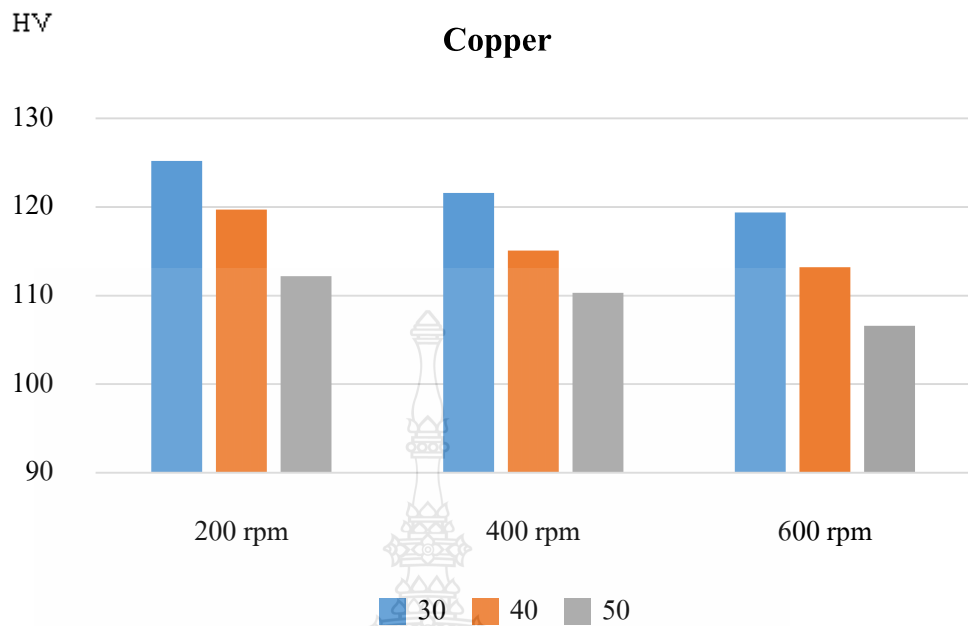


แสดงความแข็งผิวที่เกิดขึ้นหลังทำการขึ้นรูปแผ่น โลหะอลูมิเนียมด้วยมุมที่แตกต่างกันคือมุม 30, 40 และ 50 องศา และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกันคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบสูงสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยมุม 30 องศา ด้วยความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกด 200 รอบต่อนาที เท่ากับ 44.07 HV และความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบต่ำที่สุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยมุม 50 องศา ด้วยความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกด 600 รอบต่อนาที เท่ากับ 42.57 HV



แสดงความแข็งผิวที่เกิดขึ้นหลังทำการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยมุมที่แตกต่างกันคือมุม 30, 40 และ 50 องศา และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกดที่แตกต่างกันคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบสูงสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยมุม 30 องศา ด้วยความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกด 200 รอบต่อนาที เท่ากับ 230 HV และความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบต่ำสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยมุม 50 องศา ด้วยความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกด 600 รอบต่อนาที เท่ากับ 200.5 HV





แสดงความแข็งผิวที่เกิดขึ้นหลังทำการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองแดงด้วยมุมที่แตกต่างกันคือมุม 30, 40 และ 50 องศา และความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกัดที่แตกต่างกันคือ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที ความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบสูงสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยมุม 30 องศา ด้วยความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกัด 200 รอบต่อนาที เท่ากับ 125.2 HV และความแข็งผิวที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบต่ำสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยมุม 50 องศา ด้วยความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกัด 600 รอบต่อนาที เท่ากับ 106.6 HV



ภาคผนวก ข

ส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติทางกล

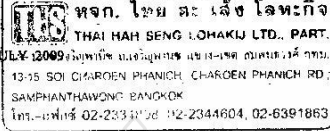


บริษัท อลูมิเนียม ชือ ฉิ้น ฮั่ว จำกัด

ALUMINIUM CHUE CHIN HUA CO.,LTD.

6 MOO 4 SUKSAWAD ROAD, BANGKRU, PHRAPRADAENG, SAMUTPRAKARN, THAILAND 10130

CERTIFICATION OF ALUMINIUM ALLOY 1100



CERTIFICATION NO.09237

DATE : 7 JULY 2009
CUSTOMER :
P/O NO. :
ALLOY & TEMPER : AL. SHEETS AA1100-H14
DIMENSIONS : #23 X 4' X 8' = 220 Pcs.#30577;B-0379
#25 X 4' X 8' = 270 Pcs.#30727;B-0353

PHYSICAL TESTING RESULT

CHEMICAL COMPOSITION %

Table with 12 columns: STD.AA1100, Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Zn, Ni, Cr, Ti, Others, Al. Rows include COIL NO. 30577 and 30727 with their respective chemical compositions.

MECHANICAL PROPERTIES

Table with 4 columns: SPECIFIED LIMITS, ULTIMATE STRENGTH (MPa), YIELD STRENGTH (MPa), ELONGATION Percent. Rows include COIL NO. 30577 and 30727 with their mechanical test results.

R. Wararat

HEAD OF LABORATORY

K. insarak

SUPERVISOR APPROVED

REMARK: TEST FOR ROLLING DIRECTION.





**SAM POONGSAN METAL CO., LTD.**

**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

38/14 Lamdangsubing Industrial Estate, Mue B. T. Tongpruangsri, A. Srisakra, Chonburi 20030, Thailand Tel: 6639400-088-8 Fax: 6639400-089

Customer Name: SOI CH. RUEY PHINICH CHAROEN PHANICH RL  
 Address: SAMPHAN THAWONG BANGPOK  
 TEL: 02-2334205, 02-2334205, 02-5391840

Certificate No: CTSE-12-0180  
 Date: 17-Jan-12  
 Order No: TML1128003A-3  
 Net Weight: 1,481.00 Kg.

Article and Temper:	JIS H3100 C2801P 1/4H
Size:	0.500 x 355.60 x 1219.00

**Chemical Composition**

Master Coil No.	Cu (% wt)	Zn (% wt)	Pb (% wt)	Fe (% wt)	P (% wt)	Cd (% wt)	Ni (% wt)	Total Impurities (% wt)
Specification	Min 59.00 Max 62.00	REM REM	0.10000 0.0019	0.07000 0.0126	0.0002	< 0.0001	0.0038	0.0217
189222	59.73	REM						

**Mechanical Properties**

Master Coil No.	Hardness HV 1 Kg	Tensile (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Grain Size (mm)	Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Bending Test
Specification	Min 85.00 Max 115.00	355.00 440.00	26.00 35.35			Good Way R/T= Bad Way R/T=
189222	115.00	436.44				

**Physical Dimension**

Master Coil No.	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Camber (mm)	Burr (mm)	Curl (mm)	Reughness (um)
Specification	Min 0.480 Max 0.520	355.40 355.80	1,215.00 1,224.00		0.550		Re Rmax
189222	0.505	355.62	1,221.50		0.516		

We hereby certify that above material has been tested to comply with the specification.

*Amirul Sam*

Khaiblen Kamla  
 Engineer  
 QA/QC Department

Tuesday, 17 January, 2012  
 DRS-QAC-F-28 Rev. 00

**ภาคผนวก ค**  
**ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่**



อิทธิพลของปัจจัยวัสดุที่มีผลต่อแรงในการขึ้นรูป  
ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด  
Influence of the Material Parameters on Forming Force  
By Single Point Incremental Forming Process

ศิริโชค แหยมเจริญ<sup>1\*</sup> ธงชัย เพ็งจันทร์<sup>2</sup> ศิริชัย ต่อสกุล<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
อำเภอองรักษ์ จังหวัดนครนายก รหัสไปรษณีย์ 26120

E-mail: tong\_ie\_classic@hotmail.com\*

\* Sirichok Yamjalean<sup>1\*</sup> Thongchai Pangjundee<sup>2</sup> Sirichai Torsakul<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology,  
Thanyaburi, Phatumthani 12110

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University  
Ongkharak, Nakhonnayok 26120

E-mail: tong\_ie\_classic@hotmail.com\*

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแรงที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดในการขึ้นรูปวัสดุต่างชนิดกัน โดยทำการขึ้นรูปโลหะประเภททองแดงแผ่น ทองเหลืองแผ่น อะลูมิเนียมแผ่น ที่ความหนา 0.6 มิลลิเมตร ให้มีรูปทรงปริมาตรหัวตัดสี่เหลี่ยม 20 มิลลิเมตร ด้วยปัจจัยการทำงานที่ถูกกำหนดไว้คือ มุมในการขึ้นรูป 30 องศา ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาทีและความเร็วเดิน 200 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะการกดในแต่ละรอบเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร โดยวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูปจะเป็นโลหะตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 ทำการขึ้นรูปให้ปลายมีรูปทรงกลมขนาด 8 มิลลิเมตร เพื่อทำการกดลงบนพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทำการทดลองทำการวัดค่าของแรงรวมเฉลี่ยที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองพบว่าการขึ้นรูปทองเหลืองแผ่นก่อให้เกิดแรงรวมเฉลี่ยในการขึ้นรูปมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 132.71 นิวตัน และการขึ้นรูปทองแดงแผ่นใช้แรงรวมเฉลี่ยในการขึ้นรูปเท่ากับ 107.10 นิวตัน และการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแผ่นใช้แรงรวมเฉลี่ยในการขึ้นรูปน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 68.79 นิวตัน ดังนั้นวัสดุต่างชนิดกันมีอิทธิพลผลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสแบบจุด โดยวัสดุประเภทอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามขึ้นงานก็เกิดการฉีกขาดได้สูงเช่นกัน

**คำหลัก** กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดแรงรวมเฉลี่ย ทองแดงแผ่น ทองเหลืองแผ่น อะลูมิเนียมแผ่น

## Abstract

The objective of this research is to study forces generated by the influence of the Single Point Incremental Forming Process for different materials. At a forming angle of 30 degrees, sheet copper, sheet brass and sheet aluminum, each of thickness 0.6mm, are formed in a shape of 20mm truncated square pyramid. Experimental factors include a speed of 400rpm, a feed rate of 200 mm/minute and a pressing distance of 0.5mm. 8mm SKD 11 round metal with JIS standard is used as a forming tool for those metals in order to measure an overall average force. The research found that sheet brass has highest overall average force of 132.71 Newton, followed by sheet copper's overall average force of 107.10 Newton and sheet aluminum's overall average force of 68.79 Newton. Consequently, different kinds of materials contribute to forces involved in the Single Point Incremental Forming Process, and aluminum has lowest force in forming process, but it is most likely to tear up.

**Keywords:** Single Point Incremental Forming Process Overall average force Sheet copper Sheet brass Sheet aluminum

## 1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น นั้นมีความสำคัญโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิต ชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในปัจจุบัน นั้นการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีค่าใช้จ่ายสูงจากการทำแม่พิมพ์ ในการขึ้นรูป ดังนั้นจึงได้มีการเสนอแนวคิดใหม่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป[1] นั่นก็คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสแบบ จุด ซึ่งสามารถใช้ขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร รอบแกน โดยตอบสนองต่อระบบเศรษฐกิจในปัจจุบันที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิต, กำลังที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่น้อยลง, อุปกรณ์ที่ใช้ไม่มีความซับซ้อน และ ลดกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นจากเดิมทำให้ตอบสนองความต้องการของผู้ผลิตที่ต้องการลดค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนยุ่งยากในการผลิตจากกระบวนการขึ้นรูปเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุ ทองแดงแผ่น, ทองเหลืองแผ่น, อลูมิเนียมแผ่น ที่มีความสามารถในการขึ้นรูปได้สูงและเป็นที่ยอมรับในงาน อุตสาหกรรม, อุปกรณ์จับยึดแผ่นโลหะ ลักษณะการทำงานมีดังต่อไปนี้คือ มีการใช้อุปกรณ์ขึ้นรูปรูปทรงกระบอกที่มีปลายรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด โดยวัดแรงที่เกิดขึ้นด้วยอุปกรณ์วัดแรงประเภท

Load cell และมีระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตซึ่ง นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายประเภทในปัจจุบัน

## 2. รูปแบบการทดลอง

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็น จุด วิธีนี้เป็นการทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรเฉพาะ ตำแหน่งบนแผ่นโลหะ โดยใช้เครื่องมือรูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนรอบแกนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด[2]และเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่กำหนดด้วยระบบคอมพิวเตอร์กดลงบนชิ้นงานโลหะแผ่นที่ถูกยึดตรึงให้แน่นอยู่ในชุดจับยึดไปตามเส้นทางที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม(CAM)[3] และใช้เครื่องกัดแนวตั้งCNC Milling Arrow 500 เป็นเครื่องมือกลที่ใช้ในการขึ้นรูป การทดลองนี้มุ่งเน้นถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ถูกทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรบนแผ่นโลหะ ทองแดง, ทองเหลือง, อลูมิเนียม[4]

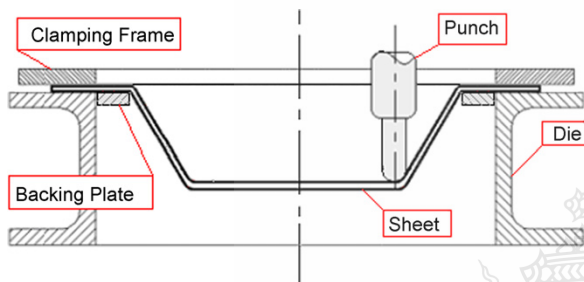


ตารางที่ 1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี

ชนิด	ปริมาณส่วนผสมทางเคมี						
	ทองเหลือง	Cu	Zn	Cl	Mg	P	Others
	61.34	38.40	0.07	0.04	0.03	0.1	0.02
อลูมิเนียม	Si+Fe	Cu	Mn	Ni	Ti	Others	Al
	0.623	0.066	0.004	0.005	0.031	0.011	99.26
ทองแดง	Cu	Others	-	-	-	-	-
	99.96	0.04					



รูปภาพที่ 2 ทูลสำหรับกดขึ้นรูป ปลายรูปทรงกลม ขนาด 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด [5]



รูปภาพที่ 3 เครื่องกัดแนวตั้ง Arrow 500

### 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

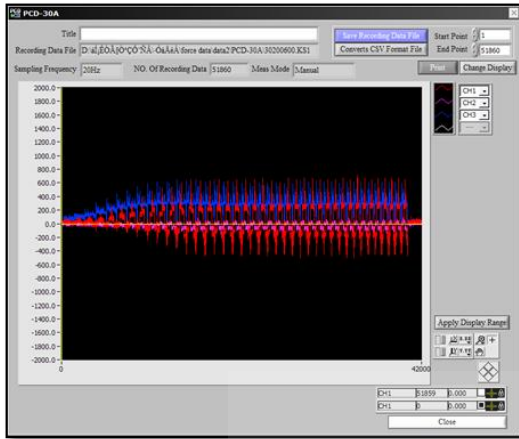
#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

การดำเนินการทดลองการขึ้นรูปด้วย กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด จำเป็นต้องมี ดังนี้

1. เครื่องกัดแนวตั้ง CNC Milling Arrow 500
2. ทูลสำหรับกดขึ้นรูป ปลายรูปทรงกลมขนาด 8 มิลลิเมตร
3. สารหล่อลื่น ประเภทจารบี เกรด SG 306
4. อุปกรณ์สำหรับจับยึดวัสดุ
5. อุปกรณ์สำหรับวัดแรงประเภท Load cell
6. อุปกรณ์บันทึกค่าแรง

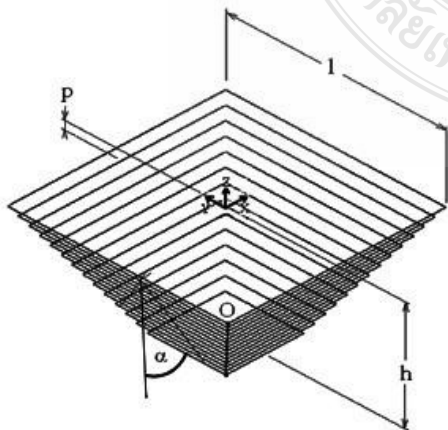
#### 3.2 วิธีการทดลอง

ในการวัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปนั้นจะทำการวัด โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงประเภท Load cell โดยในการติดตั้งนั้นจะทำการยึดกับอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นวัสดุต่างๆทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงเข้ากับอุปกรณ์บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกผลเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่าที่เกิดขึ้นจากการทดลองโดยแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะการบันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้น  
ขณะทำการขึ้นรูป

ในการทดสอบนี้ จะใช้การขึ้นรูปทรง ที่ง่ายต่อการ  
ขึ้นรูปโดยในการทดสอบจะทำการขึ้นรูปโดยมีรูปทรงแบบ  
พีรามิดหัวตัด โดยฐานของพีรามิดเป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่า  
โดยในการขึ้นรูปจะควบคุมเส้นทางการเดินขึ้นรูปให้  
เป็นไปตามที่กำหนดไว้ด้วยระบบ CAM กำหนดความลึก  
ในการขึ้นรูปไว้ที่ความลึก 20 มม. และมีค่าการกดขึ้นรูป  
ในแนวแกน Z เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และมีการใช้สาร  
หล่อลื่นประเภทจารบีในการลดการเสียดสีและจะมีการ  
กำหนดมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ 30 องศา ความเร็วรอบ  
400 MM/min ความเร็วในการเคลื่อนที่ 200 rpm/min  
และมีการกำหนดตัวแปรคือ วัสดุที่ทำการขึ้นรูปคือ  
ทองแดงแผ่นหนา 0.6 mm ทองเหลืองแผ่นหนา 0.6 mm  
อลูมิเนียมแผ่นหนา 0.6 mm โดยในการขึ้นรูปนั้นจะมีการ  
ใช้ค่าพื้นฐานในการกำหนดการทำงานของเครื่องกัด  
CNC เท่ากัน

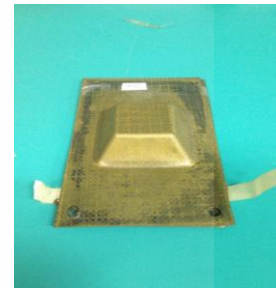


รูปภาพที่ 6 แสดงมุม, เส้นทางการเดินของทูล [6]

ตารางที่ 2 ตารางแสดงปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูป

Process parameter	
l (mm) (Width)	58 mm
p(mm) (Depth)	0.5 mm
h(mm) (Height)	20 mm
$\alpha$ (°)	30
Feed (mm/min)	200
Speed (rpm/min)	400

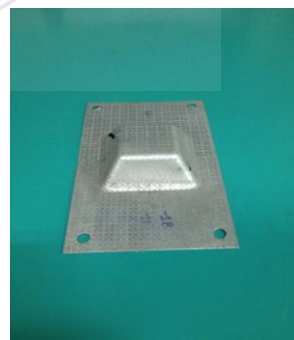
ลักษณะการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา



รูปที่ 7 ทองเหลืองแผ่น ที่มุม 30 องศา ความเร็วรอบ 400 rpm

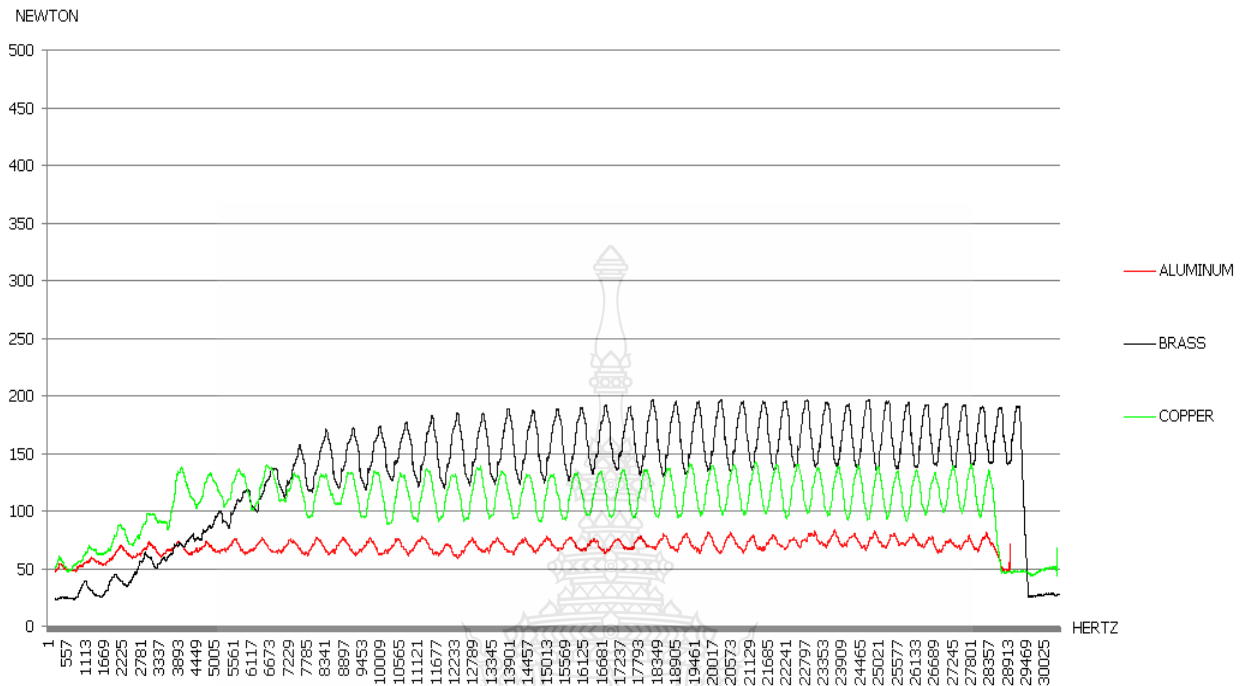


รูปที่ 8 ทองแดงแผ่น ที่มุม 30 องศา ความเร็วรอบ 400 rpm



รูปที่ 7 อลูมิเนียมแผ่น ที่มุม 30 องศา ความเร็วรอบ 400 rpm

#### 4. ผลการทดลองและการวิจารณ์



รูปภาพที่ 7 ค่าแรงที่เกิดขึ้นจากปัจจัยมุมใช้ในการ

#### วิเคราะห์ผลของปัจจัยในการทำงาน ที่มีผลแรงรวมเฉลี่ยที่ใช้ในการขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าค่าแรงรวมเฉลี่ยที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทั้งสามชนิด แรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าแตกต่างกันแต่จะมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของแรงที่คล้ายคลึงกัน โดยแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการขึ้นรูปของโลหะแต่ละชนิดจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเมื่อทำการขึ้นรูปไปได้ซักระยะหนึ่งแรงที่เกิดขึ้นก็จะเข้าสู่สภาวะที่นิ่งเสถียรคือ มีค่าที่เพิ่มขึ้นและลดลง อย่างสม่ำเสมอโดยโลหะแต่ละชนิดมีค่าแรงรวมเฉลี่ยสูงสุดที่แตกต่างกัน คือ

1. การขึ้นรูปทองแดงแผ่น ที่มุม 30 องศา ความเร็วรอบ 400 rpm ใช้แรงรวมเฉลี่ยในการขึ้นรูปเท่ากับ 107.10 N
2. การขึ้นรูปทองเหลืองแผ่น ที่มุม 30 องศา ความเร็วรอบ 400 rpm ใช้แรงรวมเฉลี่ยในการขึ้นรูปเท่ากับ 132.71 N
3. การขึ้นรูปอลูมิเนียมแผ่น ที่มุม 30 องศา ความเร็วรอบ 400 rpm ใช้แรงรวมเฉลี่ยในการขึ้นรูปเท่ากับ 68.79 N

#### 5. สรุป

จากผลการทดลองทำให้เห็นได้ว่าการขึ้นรูปแผ่นโลหะโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดนั้น ชนิดของแผ่นโลหะที่เลือกใช้จะส่งผลต่อแรงรวมเฉลี่ยที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปและสามารถสรุปได้ว่าทองเหลืองแผ่นใช้แรงรวมเฉลี่ยในการขึ้นรูปมากที่สุด รองลงมาคือทองแดงแผ่น และ สุดท้ายคือ อลูมิเนียมแผ่น ดังนั้นอลูมิเนียมแผ่นเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ในกรณีที่ไม่ต้องทำให้เกิดค่าแรงสูงในขณะที่ขึ้นรูปมากที่สุด เนื่องจากใช้แรงรวมเฉลี่ยน้อยที่สุดแต่ชิ้นงานก็เกิดการฉีกขาดได้สูงเช่นกัน เนื่องจากเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงต่ำสุดด้วยเช่นกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Fratini G Ambrogio,R Di Lorenzo, L.Filice, F. Micari, Influence of mechanical properties of the sheet material in single point incremental forming ,CRIP Ann.53 (1) (2004) 207-210
- [2] Leszak, E Patent US3342051A1, Published 1967-01-19 Apparatus and Process for incremental Dieless Forming
- [3] J. Jeswiet,rapid proto-typing with incremental single point forming,CAD/CAM Comput.Grapics 15 (2000) 177-183
- [4] Kathryn Jackson ,Julian Allwood ,The mechanic of incremental sheet forming, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 1158-1174
- [5] LEVANSY, F. Bariani ,MODELING OF SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING PROCESS FOR METAL AND POLYMERIC SHEET Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale Università degli Studi di Padova (2009)
- [6] M.Durante, A.Formisano ,A.Langella, F Mimola Capece Minutolo ,The influence of tool rotation on an incremental forming process, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 4621-4626

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นาย ศิริโชค แหมมเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	2 มกราคม 2529
ที่อยู่	76 หมู่ 2 ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ตำแหน่งวิศวกร บริษัท ไทยชูซูกิมอเตอร์ จำกัด พ.ศ. 2551 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-6090-2383
อีเมล	tong_ie_classic@hotmail.com

