

อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง  
โดยการสัมผัสเป็นจุดโดยการทำงานด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข

**INFLUENCE OF FORMING BRASS PLATE WITH A SINGLE POINT  
INCREMENTAL FORMING PROCESS BY  
COMPUTER NUMERICAL CONTROL SYSTEM**

**ธงชัย เพ็งจันทร์ดี**

**THONGCHAI PANGJUNDEE**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการ  
สัมผัสเป็นจุดโดยการทำงานด้วยระบบด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข

ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
พ.ศ. 2554

**INFLUENCE OF FORMING BRASS PLATE WITH A SINGLE POINT  
INCREMENTAL FORMING PROCESS  
BY COMPUTER NUMERICAL CONTROL SYSTEM**

THONGCHAI PANGJUNDEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN MANUFACTURING ENGINEERING DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายธงชัย เฟื่องจันทร์ดี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองเหลืองด้วย กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข
นักศึกษา	นายธงชัย เฟ็งจันทร์ดี
รหัสประจำตัว	115270440124-7
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

### บทคัดย่อ

กรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่นในปัจจุบันยังเป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการผลิต ซึ่งในการที่จะผลิตให้ได้ซึ่งการแปรรูปโลหะแผ่นให้มีขนาดรูปร่างให้เป็นไปตามที่ต้องการนั้น จะประกอบไปด้วยขั้นตอนในการทำงานในหลายๆส่วน เช่น ขั้นตอนการออกแบบ ขั้นตอน การผลิต การแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่ง แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีความซับซ้อนในการผลิต และมีราคาสูง และในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นต้องใช้เครื่องจักรกำลังในการทำงานสูงในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วย อีกทั้งด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะด้วยแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบเดิมนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน จึงมีการนำเสนอแนวคิดใหม่ ในกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยไม่มีการใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูป นั่นก็คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะทำการศึกษาถึงปัจจัยในการทำงานที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เพื่อจะสามารถนำไปเป็นแนวทางและทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ต่อไป

การดำเนินการทดลองจะใช้วัสดุเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS เกรด SKD11 ทำการขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแท่งยาว 60 มิลลิเมตร และมีปลายเป็นรูปครึ่งทรงกลม ขนาด 10 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองที่มีส่วนผสม Cu เท่ากับ 61.34 เปอร์เซ็นต์ และ Zn เท่ากับ 38.4 เปอร์เซ็นต์ โดยให้มีขนาด 150 × 90 มิลลิเมตร หนา 0.6 มิลลิเมตร โดยกดและป้อนลงบนพื้นผิวแผ่นโลหะให้เป็นรูป ปริามิดหัวตัด ขนาด 58 × 58 มิลลิเมตร ลึก 20 มิลลิเมตร โดยใช้จารบีเป็นสารหล่อลื่นในการขึ้นรูป และทำการขึ้นรูปด้วย ปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัยหลักคือ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยจะทำการวัดอิทธิพลที่มีผลต่อการทำงานซึ่งอยู่ในรูปของแรงที่ใช้ในการทำงาน และอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะหลังการขึ้นรูปและ ความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวโลหะที่ผ่าน

จากผลการทดลองพบว่าทั้ง ปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์นั้นทั้งหมดเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสเป็นจุด โดยในส่วนของมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้น มีผลต่อทั้งในส่วนของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป, อัตราความเครียดผิวและค่าความหยาบผิวเฉลี่ย จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดตามปัจจัยมุมที่ทำการขึ้นรูป ส่วนในปัจจัยความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นจะก่อให้เกิดค่าความเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น และ ความเร็วในการเดินขึ้นรูปจะมีผลในส่วนของความเครียดผิวที่เกิดขึ้น และทำให้สามารถสรุปได้ว่า ในส่วนของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป นั้น ปัจจัยการขึ้นรูปที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดของแรงที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปมากที่สุดคือมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป และมุมที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยมีผลก่อให้เกิดแรงที่เกิดขึ้นในการทำงานน้อยที่สุด คือการขึ้นรูปที่มุม 50 องศาโดยมีค่าเท่ากับ 572.23 นิวตัน ส่วนในปัจจัยที่มีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานนั้น คือปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินขึ้นรูป และสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยมุมที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยก่อให้เกิดอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานต่ำสุด คือการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา โดยมีค่าเท่ากับ 21.64 % และ ความเร็วในการเดินขึ้นรูปของอุปกรณ์ที่ความเร็ว ที่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตรต่อนาที และในส่วนของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยนั้น ปัจจัยที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะต่ำสุด คือการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา โดยมีค่าเท่ากับ 0.59 Ra และปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูปที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะต่ำสุด คือความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ความเร็ว 200 ต่อนาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ต่ำสุด

**คำสำคัญ :** กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสเป็นจุด/ อัตราความเครียด/ ความหยาบผิวเฉลี่ย

**Thesis Title :** INFLUENCE OF FORMING BRASS PLATE WITH A  
SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING PROCESS BY  
COMPUTER NUMERICAL CONTROL SYSTEM

**Student Name :** Mr.Thongchai Pangjundee

**Student ID :** 115270440124-7

**Degree Award :** Master of Engineering

**Study Program :** Manufacturing Engineering

**Academic Year :** 2010

**Thesis Advisor :** Dr. Sirichai Torsakul

### ABSTRACT

Sheet metal forming process is still a complicated process in manufacturing. In order to get the production process of sheet metal to shape according to their choice. Consists of a process at work in many parts of such process The design process of production of molds used in forming the mold used in forming sheet metal is complex to manufacture and have High price and In forming a mold formed of sheet metal requires a high-capacity machines in sheet metal forming by Moreover, with the process of forming a mold in its original form is more complicated. Has presented a new concept. In the process of forming sheet metal without the use of molds forming. That is the single point incremental forming process. It studies the factors at work that affect the forming of sheet metal forming process with single point incremental forming process. So that it can be used as guidelines and alternatives for the industrial production of sheet metal forming

The evaluated material was standard JID grade SKD11 that was formed as bar with 60 mm in long and its tip was hemisphere shape 10 mm. It was used for forming tool for Brass plate containing Cu and Zn were equal to 61.34 percent 38.4 percent. The forming process were to press and spin on metal surface into pyramid frusta  $58 \times 58$  mm with 20 mm in deep using grease as a lubricant in the forming process. There are three forming factors were forming angle, speed, and feed rate they was used for determining the effect on forming force and strain rate occurring on metal surface after formed and average surface roughness of metal after formed. Then compare the characteristics of the image occurs with analyzing the behavior of each factor.

The results showed that both angle forming , feed, and speed are all factors that affect the working process of a single point incremental forming process. The factors used in the angle formed. Affects both the force used in forming, strain rate and surface roughness average A value changes significantly by the factors angle formed. The speed of the factors that cause the changes in average surface roughness increased and speed will result in forming the surface strain occurs. And conclude that The use of force in forming the forming factors the impact of the forces that occur in forming the most is. The angle formed. And angle suitable for forming a single point incremental forming process with the realization of force arise at work in the experiment were minimal is angle forming a 50 degree angle is equal to 572.23 Newton. The factors affecting the strain that occurs on the surface in the process. It is a factor angle ,feed and conclude that Factor for the angle formed by the cause of strain rate that occurs on the lowest surface is forming a 50 degree angle is equal to 21.64% and feed that is less than 300 millimeters per minute. And the average surface roughness values that. The best factor in forming the impact of the average surface roughness values that occur on the metal surface minimum is forming a 30 degree angle with a value equal to 0.59 Ra and factor in the speed of forming the impact of the average surface roughness values that occur on the metal surface minimum is the speed of the device at speeds of 200 per minute, which is a factor that causes the lowest surface roughness.

**Key word:** single point incremental forming process / strain rate / roughness average



## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคณาจารย์ทั้งหลายที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา และชี้แนะแนวทาง โดยอย่างยิ่ง ดร.ศิริชัย ต๋อสกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์หลัก ตลอดจน ดร.สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล และ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ กรรมการ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กระผมขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ นฤฤทธิ์ คชฤทธิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนด้านงานวิจัย

ท้ายนี้กระผมใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กระผม มาจนสำเร็จการศึกษา

ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี

7 พฤษภาคม 2554

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐานการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	4
1.6 ข้อจำกัดการศึกษา	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 แนวความคิด	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.3 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา	26
2.4 สรุปบท	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	29
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	44
4.1 ผลการทดลอง	44
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการทดลอง	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	71

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	
ก ข้อมูลการทดลอง	74
ข ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางเคมี	81
ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	88
ประวัติผู้เขียน	102

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics) ของเหล็ก JIS SKD 11 หรือเหล็ก DIN 1.2379	14
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดลอง	31
3.2 คุณสมบัติทางกลของแผ่นทองเหลือง	32
3.3 ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	38
3.4 ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	38
3.5 ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	38
4.1 เวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละปัจจัยการทำงาน	45
4.2 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	47
4.3 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	48
4.4 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	49
4.5 ผลการทดลองแรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูป โดย การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	50
4.6 ผลการทดลองแรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	51
4.7 ผลการทดลองแรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	52
4.8 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	54
4.9 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	56
4.10 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	57
4.11 ผลการทดลองในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) โดยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	59
4.12 ผลการทดลองในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) โดยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	61
4.13 ผลการทดลองในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) โดยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	62

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด	2
1.2 ภาพรวมการดำเนินงานวิจัย	5
2.1 ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด	6
2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป	7
2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์	8
2.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั่นขึ้นรูป	8
2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง	9
2.6 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด	10
2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ	10
2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์เฉพาะส่วน)	11
2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแบบแม่พิมพ์เต็ม	12
2.10 แนวคิดพื้นฐานในการดึงขึ้นรูปลึก	15
2.11 กลไกการดึงขึ้นรูปลึก	15
2.12 การดึงขึ้นรูป และการดึงขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า $r > 50\%$	16
2.13 การทดสอบการดึง	17
2.14 แรงดึง (Tensile)	18
2.15 แรงกด (Compression)	18
2.16 แรงเฉือน (Shear)	19
2.17 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ	19
2.18 ความเครียดเชิงเส้น	20
2.19 ความเครียดเฉือน (Shear Strain)	21
2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	22
2.21 ลักษณะตารางวงกลมกริดบนโลหะแผ่น	23
2.22 การวัดอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดและอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดรอง	24
2.23 ตัวอย่างแผนภาพแสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป	24
2.24 กราฟตัวอย่างของค่า Static Sensitivity	25
2.25 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)	26
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย	30
3.2 ชิ้นงานทดสอบแผ่นทองเหลือง	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 กระบวนการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการกัดขึ้นรูป	32
3.4 อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ	33
3.5 แผ่นทองเหลืองที่ผ่านการ ตีกรีดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า	33
3.6 กระบวนการกรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า	34
3.7 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป	35
3.8 ลักษณะการบันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป	36
3.9 ภาพแสดงมุม , เส้นทางการเดิน และ ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป	37
3.10 เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน	39
3.11 หน้าจอแสดงแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป	39
3.12 เครื่องวัดความหยาบผิวเฉลี่ยหือ Mahr รุ่น MarSurf PS 1	40
3.13 การกำหนดขนาดอ้างอิงของกริดมาตรฐาน	41
3.14 การสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน	42
3.15 การวัดขนาดกริดในแนวตั้งและแนวนอน	42
3.16 การวัดอัตรา เปอร์เซนต์ความเครียดและอัตรา เปอร์เซนต์ความเครียดรอง	43
4.1 ลักษณะการขึ้นรูปเพื่อความเครียดผิวที่ มุม 30,40 และ 50 องศา	44
4.2 รูปลักษณะของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน	45
4.3 ตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	47
4.4 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	47
4.5 ตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	48
4.6 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	48
4.7 ตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	49
4.8 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	49
4.9 แรงที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	51
4.10 แรงที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	52
4.11 แรงที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	53
4.12 รูปลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดวงกลมที่การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	54
4.13 อัตราความเครียด ในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม30 องศา	55
4.14 รูปลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดวงกลมที่การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	56
4.15 อัตรา เปอร์เซนต์ความเครียด ในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม40 องศา	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 รูปลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดวงกลมที่การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	58
4.17 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียด ในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	59
4.18 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	60
4.19 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	61
4.20 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	63
4.21 ค่าแรงที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป	64
4.22 อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป	65
4.23 ความหยาบผิวเฉลี่ยจากการใช้ปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป	67

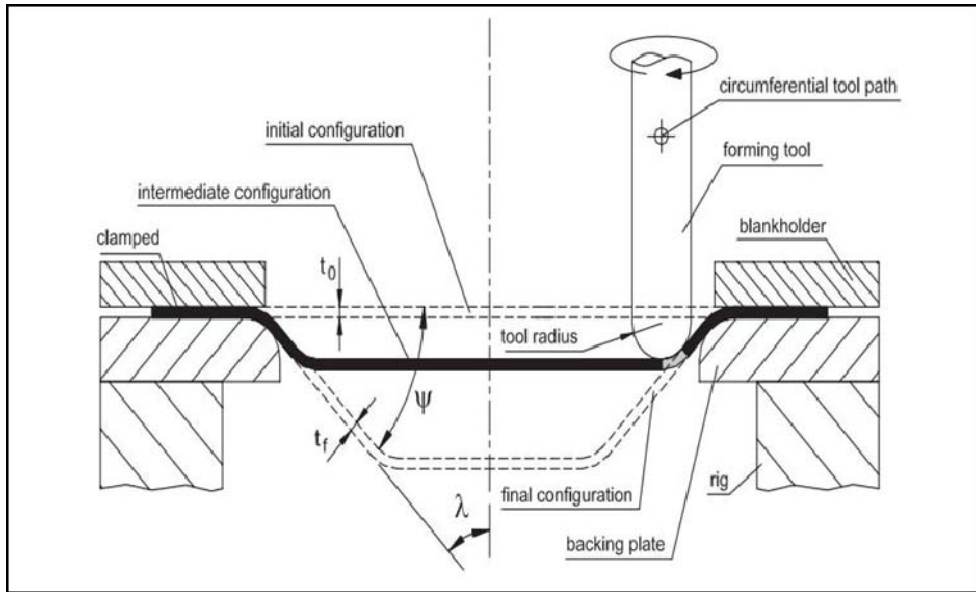
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่นในปัจจุบันยังเป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการผลิต ซึ่งในการที่จะผลิตให้ได้ซึ่งการแปรรูปโลหะแผ่นให้มีขนาดรูปร่างให้เป็นไปตามที่ต้องการนั้น กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูป จะประกอบไปด้วยขั้นตอนในการทำงานในหลายๆส่วน เช่น ขั้นตอนการออกแบบ ขั้นตอน การผลิตการแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่ง แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีความซับซ้อนในการผลิต และมีราคาสูง และในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้น ต้องใช้เครื่องจักรกำลังในการทำงานสูงในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วย อีกทั้งด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะด้วยแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบเดิมนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนนั้น ทำให้การผลิตเพื่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เป็นไปตามแบบหรือผลิตภัณฑ์ เพื่อให้คุ้มค่าในการผลิต จึงจะต้องทำการผลิตเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ราคาผลิตภัณฑ์ต่อหน่วย มีราคาตกลง ซึ่งทำให้ความสามารถในเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลิตภัณฑ์ เป็นไปได้อย่างล้าช้า ซึ่งขัดต่อความต้องการของ ผู้บริโภคในปัจจุบันซึ่งมีความต้องการความหลากหลายในรูปแบบ ของผลิตภัณฑ์ เป็นอย่างมาก ดังนั้นจากปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีการนำเสนอแนวคิดใหม่ ในกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยไม่มีการใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูป[1] โดยในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบใหม่นั้น จะมีการใช้กำลังในการขึ้นรูปแผ่น โลหะน้อยกว่ากระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบเดิมเป็นอย่างมาก และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ก็มีขั้นตอนการผลิตที่มีซับซ้อนน้อยลง[2] นั่นก็คือกระบวนการขึ้นรูปขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุดกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบใหม่ที่มีมีความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นได้อย่างรวดเร็ว และ มีความซับซ้อนในกระบวนการผลิตน้อยกว่าแบบเดิมมากทำให้สามารถตอบสนองต่อระบบเศรษฐกิจในปัจจุบันที่ความต้องการ ของผู้บริโภคมีความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยองค์ประกอบหลักของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด จะประกอบไปด้วย แผ่นโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูป, อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป, อุปกรณ์จับยึดแผ่นโลหะ และมีลักษณะการทำงานดังต่อไปนี้คือ มีการใช้ อุปกรณ์ขึ้นรูป รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [3] แล้วทำการกดลง บนพื้นผิวแผ่นขึ้นงานโลหะที่ถูกจับยึด ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรเฉพาะจุดบนแผ่นโลหะ





รูปที่ 1.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด [4]

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบถูกใช้ด้วยการสัมผัสเป็นจุด จะทำการศึกษการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุ ทองเหลืองแผ่น ซึ่งเป็นโลหะแผ่นที่มีความสามารถในการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆได้สูงและนิยมใช้งานในอุตสาหกรรมหลายๆประเภทในปัจจุบัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเช่นมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบลักษณะการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น พร้อมวิเคราะห์ลักษณะการทำงาน ในแต่ละปัจจัยในการขึ้นรูป การศึกษาจะสามารถนำไปเป็นแนวทางและทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ต่อไป

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปัจจัยในการทำงานที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

1.2.2 เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ด้านการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นโลหะทองเหลือง

### 1.3 สมมติฐานการศึกษา

1.3.1 ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยมุมที่ใช้การขึ้นรูปชิ้นงานที่แตกต่างกันนั้น ความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นทองเหลืองนั้นจะมีความแตกต่างกันไป

1.3.2 ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น

1.3.3 ความเร็วในการเดินขึ้นรูปของอุปกรณ์ มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 สร้างอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ ขนาด 90 มิลลิเมตร X 150 มิลลิเมตร

1.4.2 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป แผ่นทองเหลืองที่มีส่วนผสม Cu เท่ากับ 61.34 เปอร์เซ็นต์ และ Zn เท่ากับ 38.4 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 0.6 มิลลิเมตร ขนาด 90 มิลลิเมตร X 150 มิลลิเมตร

1.4.3 การทดลองจะใช้เครื่องจักรกัดแนวตั้ง CNC Milling Arrow 500

1.4.4 การทดลองที่ใช้จะเหล็กกล้าเครื่องมือตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD11 ทำการขึ้นรูปเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในกวดการขึ้นรูป (Punch) ด้วย เครื่องกลึง CNC ให้ปลายของอุปกรณ์ มีลักษณะครึ่งทรงกลม ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

1.4.5 การทดลองกระทำโดยใช้สารหล่อลื่น ประเภทจารบี เกรด SG 306

1.4.6 ทำการทดลองโดยกำหนดมุมที่ใช้ในกวดการขึ้นรูป

ก. 30 องศา

ข. 40 องศา

ค. 50 องศา

1.4.7 ทำการทดลองโดยใช้ความเร็วในการหมุนของ อุปกรณ์ที่ใช้ในกวดการขึ้นรูป (Punch)

ก. 200 รอบ ต่อนาที

ข. 400 รอบ ต่อนาที

ค. 600 รอบ ต่อนาที

1.4.8 ทำการทดลองโดยใช้อัตราความเร็วเคลื่อนที่ของ อุปกรณ์ที่ใช้ในกวดการขึ้นรูป (Punch)

ก. 100 มิลลิเมตรต่อนาที

ข. 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ค. 400 มิลลิเมตรต่อนาที

1.4.9 การทดลองกระทำการขึ้นรูปโดยมีระยะการ กดลงไปแนวตั้ง ครั้งละ 0.5 มิลลิเมตร จนได้ความลึก 20 มิลลิเมตร

1.4.10 ทำการทดลองโดยวัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปด้วยปัจจัยต่างๆ ด้วย โหลดเซลล์ (Load Cell) แบบสเตรนเกจ (Strain Gage)

1.4.11 ทำการวัดความหยาบผิวของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องมือวัดความหยาบผิว ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS

1.4.12 ทำการวัดอัตราความความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะวัสดุ โดยใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวัด

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยการสัมผัสเป็นจุด ด้วย แผ่นโลหะทองเหลือง โดยมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.5.1 ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

1.5.2 ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดพารามิเตอร์

1.5.3 ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ในรูปของ

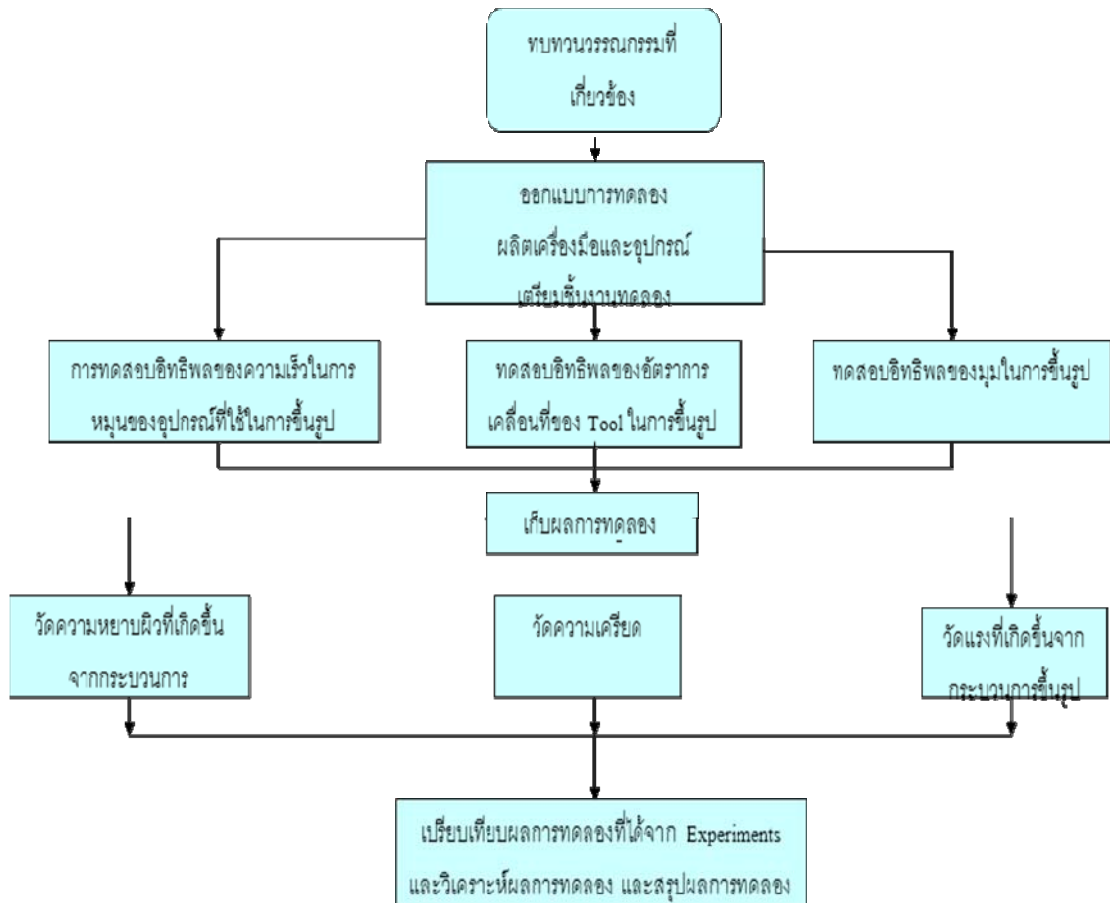
ก. ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูป

ข. ความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะ

ค. ผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย

1.5.4 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการขึ้นรูป

1.5.5 สรุปผลงานวิทยานิพนธ์



รูปที่ 1.2 ภาพรวมการดำเนินงานวิจัย

## 1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ซึ่งยังต้องมีการศึกษา องค์ประกอบและปัจจัยต่างๆ ที่จะก่อให้เกิดรูปแบบของการขึ้นรูป ที่ความสมบูรณ์ มากขึ้น ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้รูปแบบของการขึ้นรูปที่ง่าย และในการใช้ปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการทำงานนั้น จะทำการอ้างอิงกับงานวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดในอดีต

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

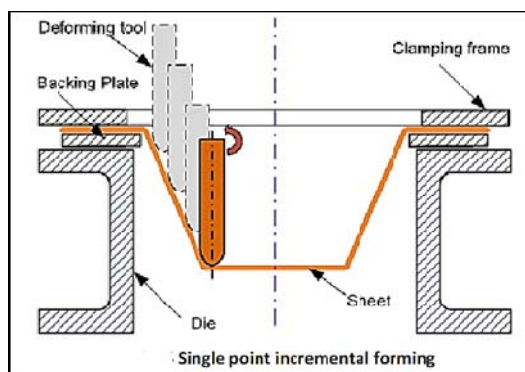
- 1.7.1 เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นทองเหลือง
- 1.7.2 เพื่อทราบถึงปัจจัยที่ผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวความคิด

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรเฉพาะจุด บนแผ่นโลหะ โดยใช้อุปกรณ์ขึ้นรูป รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [4] โดยในจุดที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวรนั้นเป็นพื้นที่เล็กๆที่เกิดจากการสัมผัสกันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับพื้นผิวของแผ่นโลหะซึ่งก่อให้เกิดความเค้นกดขึ้นเป็นผลให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยในปัจจุบันนี้ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ และยังมีปัจจัยต่างๆในการทำงานที่จะต้องศึกษา เพื่อให้เกิดกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพและเป็นระเบียบแบบแผนในการทำงาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการสำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด จะทำการศึกษาการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุ ทองเหลืองแผ่น ซึ่งเป็นโลหะแผ่นที่มีความสามารถในการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆได้สูงและนิยมใช้งานในอุตสาหกรรมหลายๆประเภทในปัจจุบัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเช่นมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบลักษณะการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น พร้อมวิเคราะห์ลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้น ในปัจจัยแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูป, ความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นโลหะและความหยابผิวของพื้นผิวโลหะที่ผ่านการขึ้นรูป โดยการศึกษาจะสามารถนำไปเป็นแนวทางและทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุดต่อไป



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด[5]

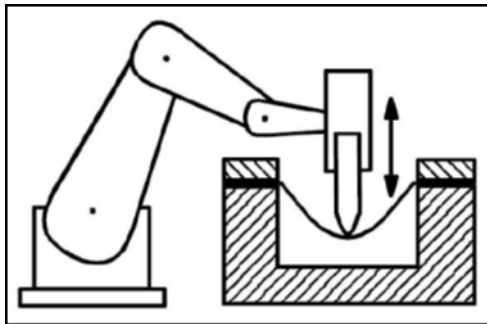
## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในลักษณะต่าง ๆ

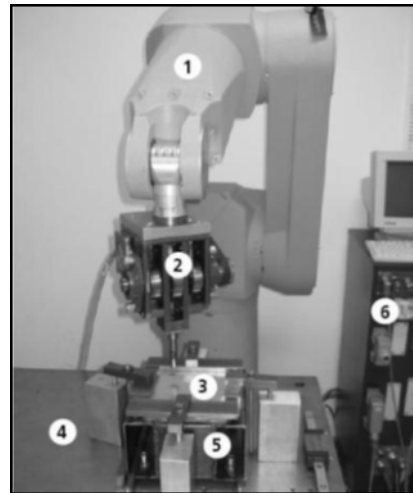
มีกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นหลายๆแบบที่ใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยกรรมวิธีนี้ ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อ เทียบกับกระบวนการขึ้นรูปแบบเดิม โดยบางส่วนของกระบวนการที่จะกล่าวถึง จะมีลักษณะการทำงานพื้นฐานที่คล้ายคลึงกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะกล่าวถึงถึงภาพรวมโดยย่อของทางเทคนิคของ กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

### 2.2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป

การกดขึ้นรูปเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่เก่าที่สุด การกดหมายถึงการทำให้โลหะต่างๆ ให้เป็นรอยนูนขึ้นคล้ายๆ กรรมวิธีการปั๊ม ในอดีตการกดขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ต้องกระทำด้วย ที่ต้องอาศัยความชำนาญ ความสามารถเฉพาะ ต้องใช้เทคนิคของช่างแต่ละคน แต่ในปัจจุบัน กระบวนการกดขึ้นรูปโลหะ ได้มีการนำเทคโนโลยี CNC และ เทคโนโลยีการใช้หุ่นยนต์มาควบคุมในการทำงาน ในการเคลื่อนที่ไปในจุดต่างๆ แล้วทำการกดลงบนพื้นผิวโลหะที่ถูกทำการจับยึด ในแต่ละขั้นตอน ของการทำงานที่ถูกกำหนด ดังรูป



(ก) ลักษณะของการกดขึ้นรูป

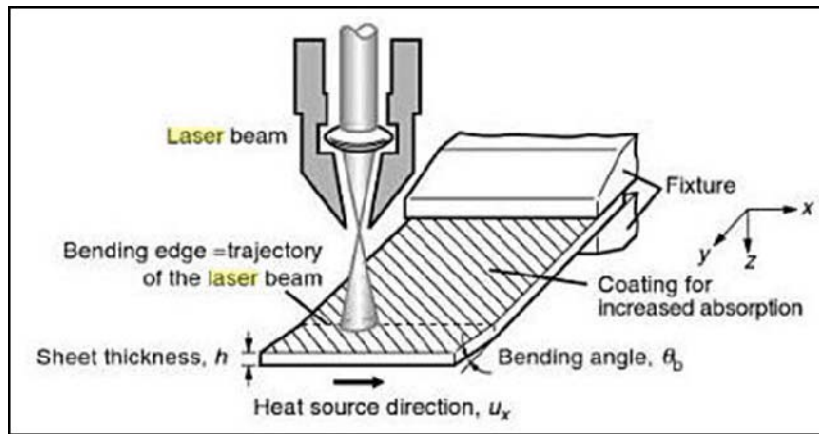


(ข) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

รูปที่ 2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป [5]

### 2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์

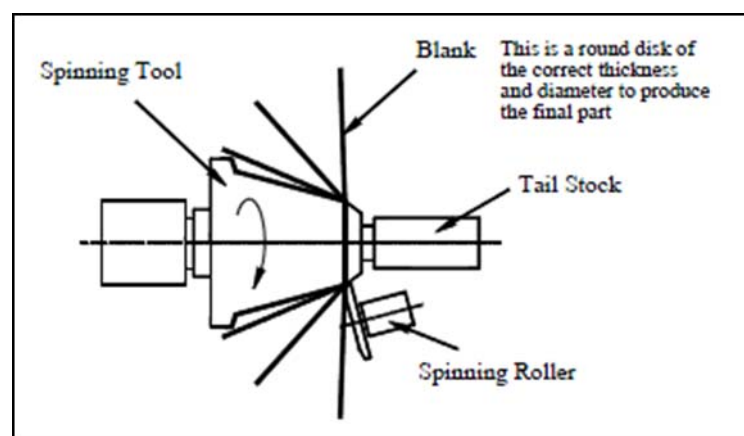
การขึ้นรูปวัสดุด้วยเลเซอร์ หรือ Laser Forming ถือเป็นกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางกลและทางความร้อน (Thermo-mechanical Forming Process) โดยหลักการของ Laser Forming คือการฉายลำแสงเลเซอร์ลงบนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดความเครียดบนพื้นผิวแผ่นโลหะที่



รูปที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์[5]

### 2.2.3 กระบวนการปั้นขึ้นรูป

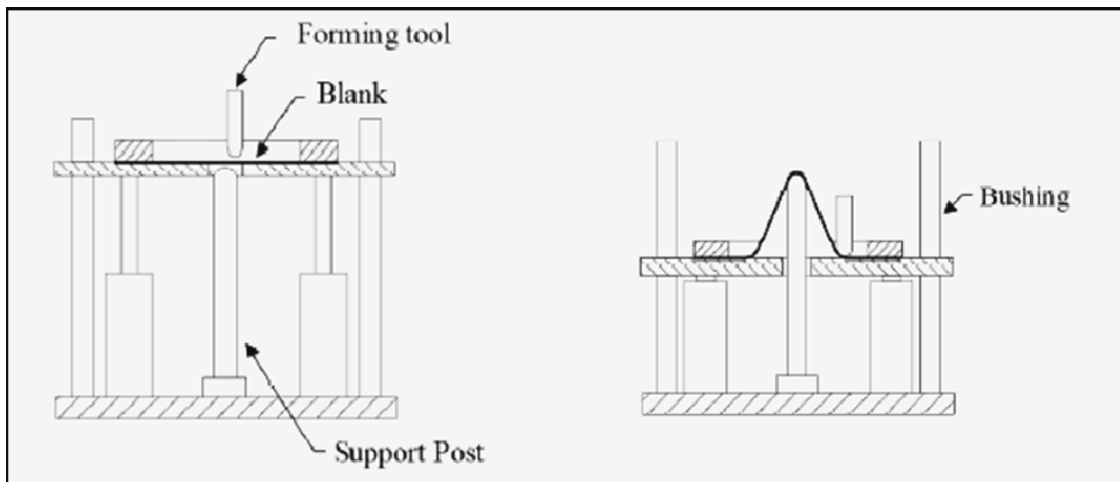
การขึ้นรูปโลหะแผ่นบางที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโพรงในรูปทรงต่างๆ การขึ้นรูปจะเริ่มต้นโดยการนำแผ่นชิ้นงานกลม (Blank) มาติดกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ให้มีจุดศูนย์กลางตรงกันแล้วจึงนำศูนย์ท้ายแทน มากดให้แผ่นชิ้นงานแนบสนิทกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ขึ้นต่อไปจะหมุนแม่พิมพ์สปินนิ่งทำให้แผ่นชิ้นงานและศูนย์ท้ายแทนหมุนตามไปด้วย หลังจากนั้นจึงนำลูกกลิ้งมารีดแผ่นชิ้นงานให้แนบไปตามแม่พิมพ์สปินนิ่ง แผ่นชิ้นงานจะค่อยๆ ถูกขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องในบริเวณเล็กๆ ที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับแผ่นชิ้นงานตามการเคลื่อนที่ของแผ่นชิ้นงานรอบๆ แกนการหมุนของแม่พิมพ์สปินนิ่ง



รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั้นขึ้นรูป[5]

## 2.2.4 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง (Incremental Sheet Forming Process)

ในปี 1994 Matsubara [5] ได้พัฒนา กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการใช้การกระทุ้งขึ้นจากด้านล่าง โดยให้แผ่นชิ้นงานทดสอบถูกจับยึดบนแท่นที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้ โดยตรงกลางของแผ่นชิ้นงานจะถูกรองรับ โดย แท่นรองรับหรือทูล และมันจะถูกควบคุมความเร็วในการหมุนโดยเครื่องจักร CNC และแท่นที่ใช้จับยึดชิ้นงานก็จะถูกกดลงสู่ด้านล่างตามระยะที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 2.3 โดยกรรมวิธีนี้สามารถผลิตชิ้นงานได้ทั้งในลักษณะที่มีรูปทรงสมมาตร และรูปทรงไม่สมมาตร



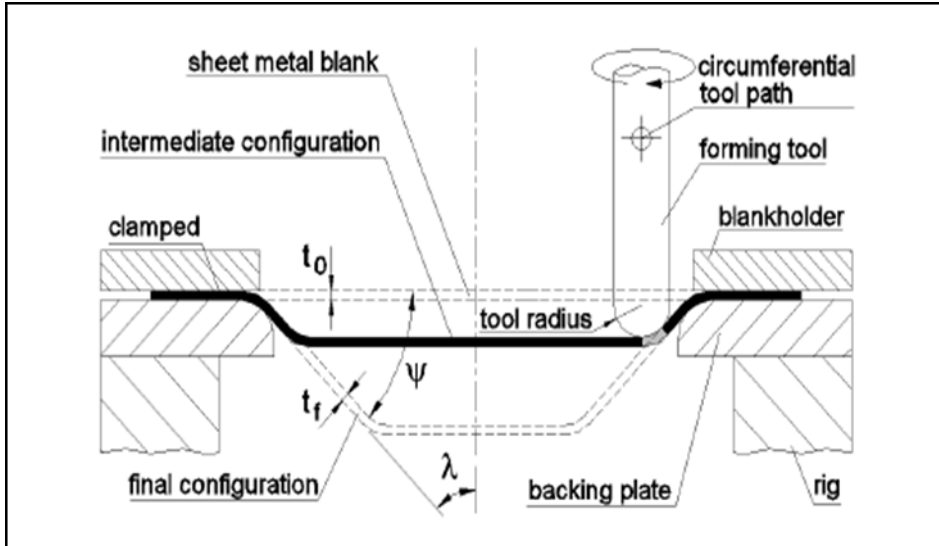
รูปที่ 2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง[5]

โดยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องได้ถูกพัฒนากระบวนการทำงานออกไปใน 3 ลักษณะ คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยสัมผัสเป็นจุด (The Single Point Incremental Forming), กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยมีทูลเคลื่อนที่รองรับ (The Incremental Forming with Counter Tool) และ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (The Two Point Incremental Forming) โดยในส่วนต่อไปจะเป็นการนำเสนอลักษณะการทำงาน ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง ทั้ง 3 ลักษณะ

## 2.2.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นลักษณะการทำงานแนวใหม่ในการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง โดยมันมีลักษณะคล้ายกับการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูป และการดึงขยายชิ้นงาน ซึ่งมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรอีกด้วย โดยแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยชุดจับยึดและถูกกดขึ้นรูปโดยหัวกดลงไป ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรเฉพาะจุด บนแผ่นโลหะ โดยใช้ทูล รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้ง และหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย

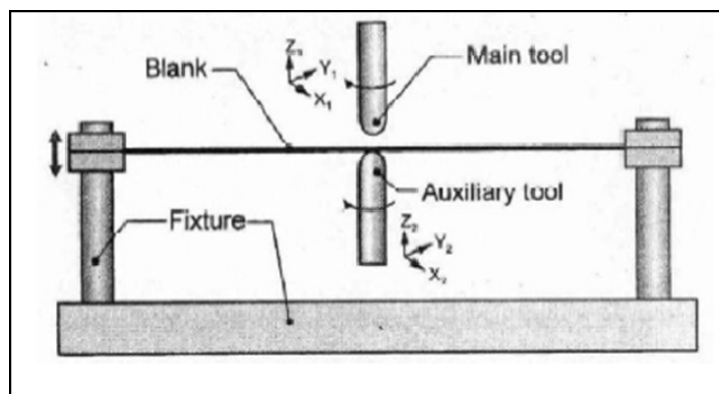




รูปที่ 2.6 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด [5]

### 2.2.6 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงานจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ที่ไม่มีการใช้แผ่นรองยึดด้านล่างและใช้อุปกรณ์ในการขึ้นรูปเสริมในด้านล่างของแผ่นชิ้นงานและเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันอุปกรณ์ขึ้นรูปหลัก



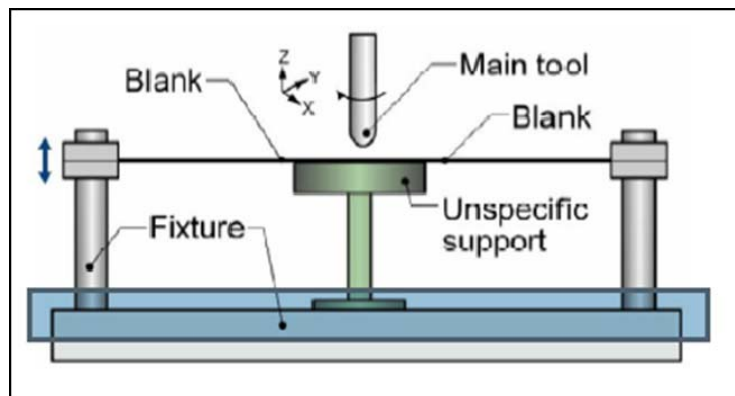
รูปที่ 2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ[5]

### 2.2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดบนชุดยึดจุดที่สามารถปรับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวแกน Z โดยใช้ทูลในการขึ้นรูปที่มีรูปร่างในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยให้ทูลทำการกดลงบนของแผ่นชิ้นงานด้านบนจากบนลงล่างตามลักษณะรูปทรงของชิ้นงานที่กำหนด โดย กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ถูกแบ่งลักษณะการทำงานเป็น 2 แบบ ตามลักษณะของ แม่พิมพ์ที่เปลี่ยนไป คือ แบบแม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน, และ แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน

### 2.2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน)

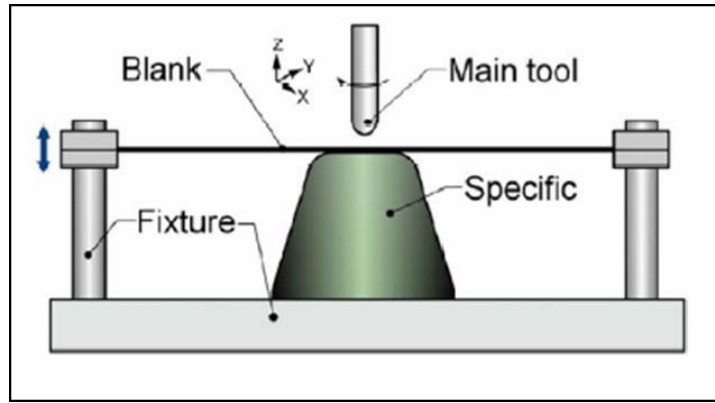
กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ แผ่นรองหลัง ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด เพียง แต่มันจะทำการรองรับเฉพาะพื้นที่ที่ถูกกำหนดของแผ่นชิ้นงาน และกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงของรูปทรงของชิ้นงาน ในลักษณะของงานที่มีการขึ้นรูปด้วยรูปทรงที่ไม่ตรงตามแบบทางเรขาคณิต อีกทั้งยังสามารถนำ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วนไปผลิตชิ้นงานอื่นๆ ที่มีความคล้ายคลึงได้ต่อไปอีกด้วย



รูปที่ 2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์เฉพาะส่วน) [5]

### 2.2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ (แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน)

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ (แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน) สามารถเรียกได้ว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในลักษณะนี้ ไม่อยู่ในแนวทางการทำงาน ที่จะไม่ใช้แม่พิมพ์ในการ แต่มันก็ช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงในการขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างมาก เนื่องจาก ในขณะที่ทำการขึ้นรูป แผ่นงานจะถูกบังคับโดยทูลให้ขึ้นรูปไปตามกับขนาดแม่พิมพ์ที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแบบแม่พิมพ์เต็ม[5]

### 2.2.10 วัสดุขึ้นงานที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

#### คุณสมบัติของทองเหลือง

ทองเหลือง (Brass) คือ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายได้ในทองแดงในรูปของสารละลายของแข็ง (Solid Solution) คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานการกัดกร่อน และมีความสามารถในการขึ้นรูปและคุณสมบัติอื่น ๆ ตลอดจนสีของทองเหลืองเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม ทองเหลืองที่ใช้งานในทางวิศวกรรม จะมีปริมาณสังกะสีไม่เกิน 40% เนื่องจากหากมีสังกะสีมากเกินไปจะทำให้ทองเหลืองมีความเปราะมากขาดความเหนียว จึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองต่างๆไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่ม คือ ประเภทรีดเป็นแท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrough Copper Alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast Copper) ซึ่งทั้งสองกลุ่มจะแยกชั้นคุณภาพ ในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกล มักจะกล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักและใช้งานกันอยู่เป็นประจำซึ่งมีอยู่ไม่มากนัก โดยแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังต่อไปนี้

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

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

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

- Aluminium Brass (Nordic Gold) ประกอบด้วยอลูมิเนียม ทนทานการกัดกร่อน ใช้ทำเหรียญยูโร

- Arsenical Brass มีส่วนผสมของสารหนู และมักจะใส่ลูมิเนียมด้วย ใช้ทำหม้อของห้องเผาไหม้
- Beta Brasses มีสังกะสี 45-50% ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงทนทาน เหมาะกับการหล่อ
- Cartridge Brass มีสังกะสี 30% มีคุณสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ
- Common Brass (rivet brass) มีสังกะสี 37% ราคาถูกและใช้ในที่เย็นได้
- DZR Brass มีส่วนผสมของสารหนูเล็กน้อย มีคุณสมบัติต่อต้านปฏิกิริยา Dezinification
- Gilding Metal เป็นทองเหลืองที่อ่อนที่สุด มีทองแดง 95% และสังกะสี 5% มักใช้เป็นส่วนประกอบของกระสุน
- High Brass มีทองแดง 65% และสังกะสี 35% มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ทำสปริง สกรู หมุด
- Leaded brass คล้ายกับชนิด alpha-beta Brass แต่ใส่ตะกั่วเพิ่ม มีความสามารถในการขึ้นรูปโหลสูง
- Low Brass เป็นโลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี มีสังกะสี 20% มีสีทองอ่อนๆ สามารถทำให้เป็นเส้นบางๆ ได้ดีเยี่ยม ใช้ทำท่อส่งน้ำ/แก๊สที่ยืดหยุ่นสูง
- Naval Brass คล้ายกับ admiralty Brass มีสังกะสี 40% และดีบุก 1%
- Red Brass สูตร คือ CuZnSn มักเรียกว่า gunmetal
- Rich Low Brass มีทองแดง 85% สังกะสี 15% ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับ
- White Brass มีสังกะสีมากกว่า 50% เปราะบาง
- Yellow Brass มีสังกะสี 33%

\*แมงกานีสจะให้ผลในการเพิ่มกำลังวัสดุของทองเหลืองได้มาก จึงเรียกทองเหลืองที่มีแมงกานีสผสมอยู่นี้ว่าบรอนซ์แมงกานีส (Manganese Bronze)

### 2.2.11 วัสดุที่ใช้เป็นเครื่องมือในการกดขึ้นรูป

เหล็กกล้าเครื่องมือมาตรฐาน JIS เรด SKD 11 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น วัสดุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ในระดับสูง และโครงสร้าง เคมเปอร์มาร์เทนไซต์ ภายหลังการชุบแข็งและอบคืนตัว (Tempering) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสที่ต่ำมากและมีความเหนียวที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่น ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นๆ (Significant Characteristics) ดังนี้

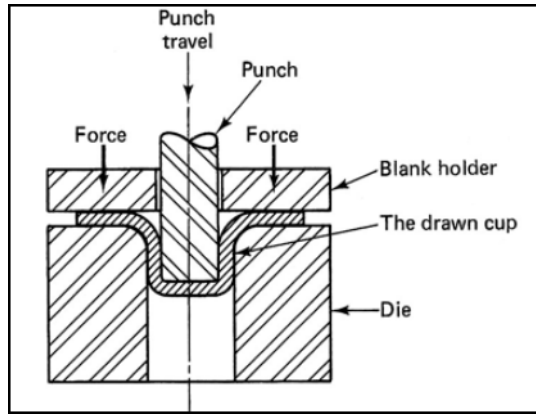
- มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมาก
- มีความเหนียวแกร่งพอใช้
- ชุบแข็ง ได้ลึกลงมาก มีความสามารถในการชุบแข็งสูงมาก และชุบแข็งในเตาสุญญากาศได้
- ต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี
- เกิดการบิดงอเล็กน้อยมากหลังการชุบแข็ง
- ต้านทานการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ดี
- สามารถทำไนไตรดิงหลังการชุบแข็งได้
- สามารถเคลือบผิวด้วยเทคนิคพีวีดีได้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไป (General Characteristics) ของเหล็ก JIS SKD 11 หรือเหล็ก DIN 1.2379

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			

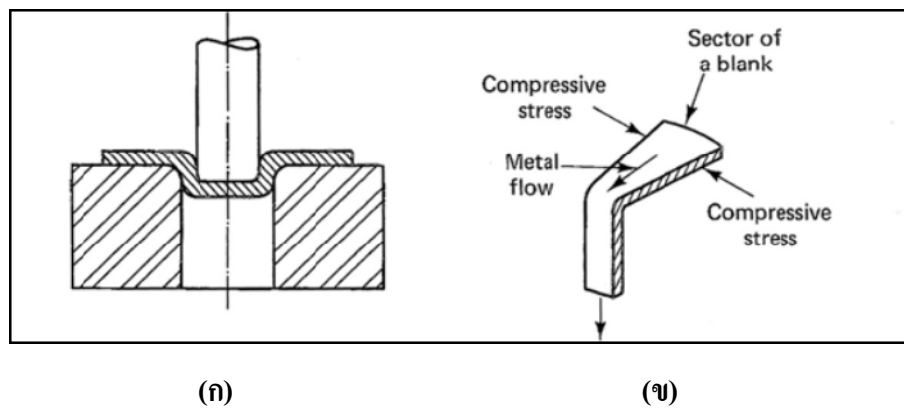
### 2.2.12 ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing operation)

การดึงขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์รูปถ้วย หรือรูปเปลือกที่มีขอบสูงจากโลหะแผ่น ดังแสดง ในรูปที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยชุดแม่พิมพ์ ที่มีขอบพื้นที่และคายเป็นรัศมีโค้ง ( $R > t$ ) เมื่อมีแรงกดกระทำที่ แผ่นโลหะชิ้นงานผ่านพื้นที่ แผ่นโลหะชิ้นงานจะไหลเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นตามแนวรัศมีเข้าหาศูนย์กลางและเปลี่ยนรูป จากแผ่นเป็นชิ้นงานรูปเปลือก การศึกษาในเรื่องของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกเป็นเรื่องที่ซับซ้อน การที่จะทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้นนั้นจะแบ่งออกเป็น การศึกษาส่วนของกระบวนการ และในที่นี้เราจะกล่าวถึงการศึกษส่วนของกลไกการขึ้นรูปในการดึงขึ้นรูปลึก



รูปที่ 2.10 แนวคิดพื้นฐานในการดึงขึ้นรูปลึก [6]

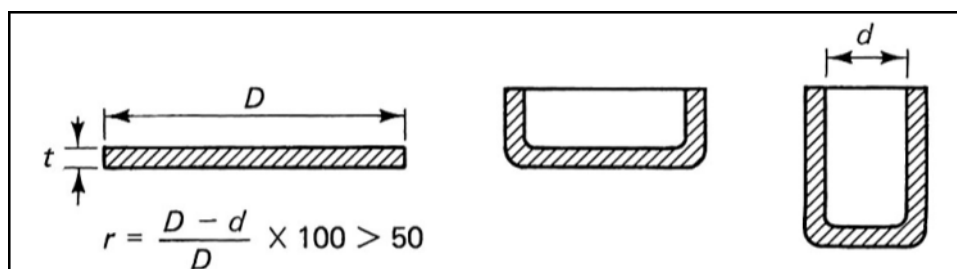
กลไกการดึงขึ้นรูปลึก (Mechanics of Deep Drawing) เมื่อพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นกระบวนการ จากรูปที่ 1 แผ่นวัตถุดิบจะเริ่มถูกตัดที่บริเวณรัศมีขอบดาบ และเมื่อเพิ่มภาระกระทำที่ตัว 펀ช์ให้มากขึ้น ทำให้แผ่น โลหะที่ถูกตัดบริเวณรัศมีดาบจะถูกดึง (หรือคดกลับ) ให้เป็นเส้นตรงอยู่ระหว่างช่องว่างของ 펀ช์และดาบ เกิดเป็น ผนังหรือเปลือกของชิ้นงานรูปถ้วยเดี่ยว ๆ หลังจากนั้น แผ่นโลหะที่อยู่ด้านนอกจะเริ่มไหลเข้าช่องเปิดดาบมากขึ้น แต่เนื่องจากที่ผิวด้านล่างของแผ่นโลหะที่สัมผัสอยู่กับผิวดาบทำให้เกิดแรงเสียดทานต้านทานการไหลของแผ่นโลหะ



รูปที่ 2.11 กลไกการดึงขึ้นรูปลึก [7] (ก) ช่วงแรกของการดึงขึ้นรูปซึ่งจะเกิดเฉพาะการคด (ข) บริเวณที่เกิดความเค้นอัดในระหว่างกระบวนการ

จากกลไกดังที่กล่าววกระบวนการดึงขึ้นรูปประกอบไปด้วยช่วงการรับภาระลักษณะต่างๆ กันของแผ่นโลหะ คือ ช่วงการคด ช่วงการดึงให้ตรง (หรือการคดกลับ) ส่งผลให้การเสียรูปอย่างถาวรของแผ่นโลหะเกิดขึ้นไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3 แผ่นโลหะที่บริเวณปีก (หรือขอบชิ้นงาน) ก่อนไหลเข้าสู่ช่องเปิดดาบจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวง

ในอุตสาหกรรมการผลิตถ้าต้องการชิ้นงานรูปถ้วยที่มีคุณภาพดี ไม่มีการฉีกขาดจะใช้ค่า  $r$  น้อยกว่า 50% ใน กรณีที่ต้องการดิ่งขึ้นรูปลึกมาก (ค่า  $r$  มากกว่า 50%) จะทำการดิ่งขึ้นรูปสองครั้ง ดังแสดงในรูป 4. ชิ้นงานที่ได้จากการดิ่งขึ้นรูปครั้งแรกจะใช้ค่า  $r$  ต่ำกว่า 50% จากนั้นจึงนำมาดิ่งขึ้นรูปซ้ำดังแสดงในรูป 5. ครั้งที่สองจะกำหนดที่ 20% และครั้งที่ 3 จะกำหนดที่ 13% ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ดิ่งขึ้นรูปซ้ำมากกว่า 3 ครั้ง ขึ้นไป ต้องนำชิ้นงานไปทำการ อบอ่อนทุกๆ 2 ครั้ง การดิ่งขึ้นรูป เสมอ เพื่อขจัดผลจากความเครียดแข็ง และหลีกเลี่ยงการแตกร้าว และเสียหายของ ผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.12 การดิ่งขึ้นรูป และการดิ่งขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า  $r > 50\%$  [6]

### 2.2.13 สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการดิ่ง (Mechanical properties tension )

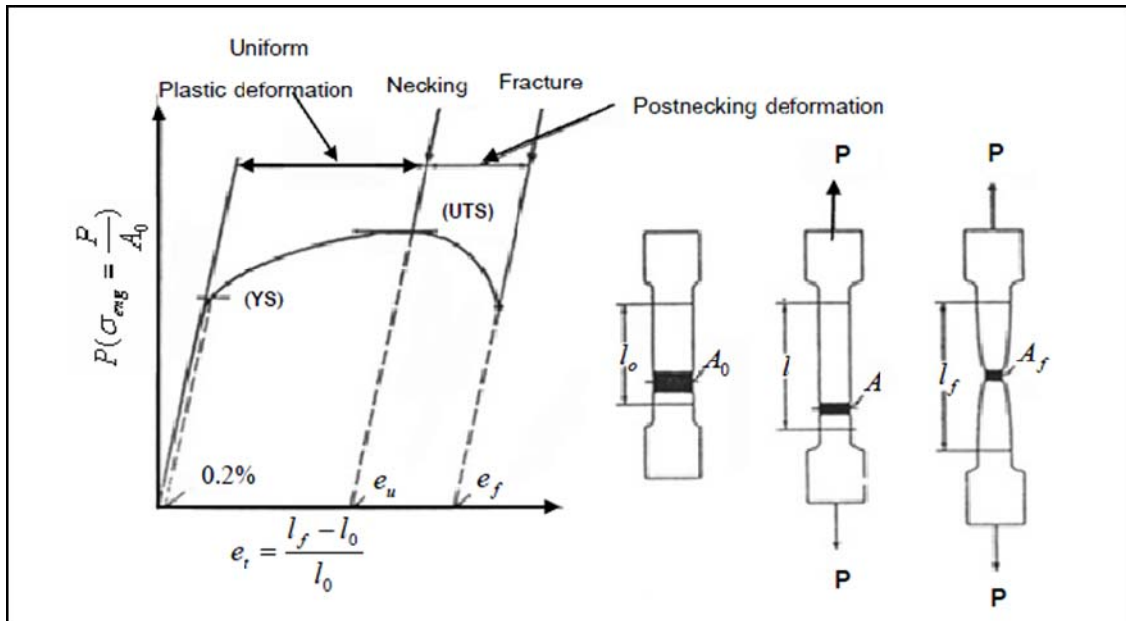
สมบัติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดของผลิตภัณฑ์คือ ความสามารถในการรับแรง (Loads) การกระทำของแรง มีหลายประเภทเช่น แรงใช้งาน (Service Load) แรงสถิต (Static Load) เป็นต้น

#### ก. การทดสอบการดิ่ง (Tension Test)

วิธีการหาสมบัติวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การทดสอบการดิ่ง (Tension Test หรือ Tensile Test) เพื่อให้ผลการทดสอบเป็นที่ยอมรับได้ทั่วไป จึงต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น ASTM Standard E8 หรือมาตรฐานอื่นซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยสากล

#### ข. เส้นโค้งความเค้นกับความเครียด (Stress-strain Curve)

ในระหว่างการทดสอบการดิ่ง ทั้งโหลดและความยืด (Elongation) เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องวัดการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความยืด จากนั้นจึงนำมาเขียนแผนภาพแรงกับการกระจัด (Force-displacement Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) ซึ่งเป็นรูปแบบของโลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้า ที่ทดสอบในอุณหภูมิปกติ



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 2.13 การทดสอบการดึง [15] (ก) ความเค้นกับการกระจัดที่หาได้จากการทดสอบวัสดุเหนียว (ข) ชิ้นทดสอบหน้าตัดขวางเดิม (ค) เปลี่ยนรูปร่างพลาสติก-สม่ำเสมอในช่วงความยาวทดสอบและ (ง) การคอดและขาด

#### ค. ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีความสอดคล้องกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

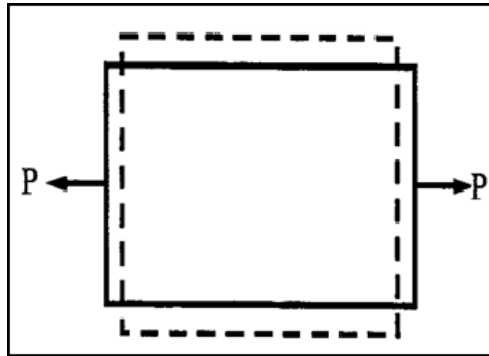
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

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



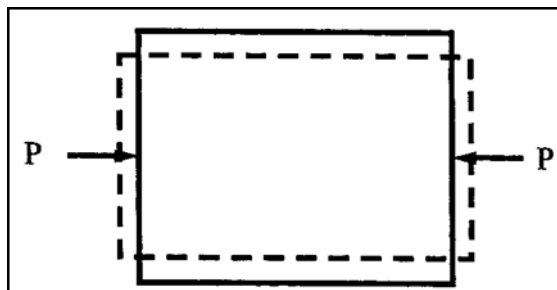
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ โดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

- ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูป



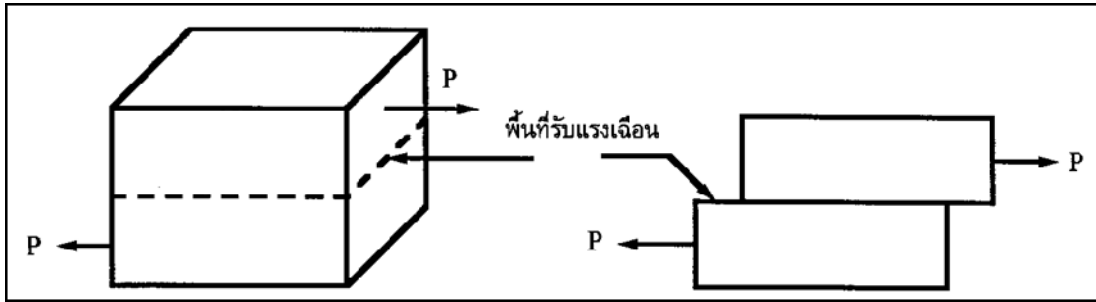
รูปที่ 2.14 แรงดึง (Tensile)

- ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูป



รูปที่ 2.15 แรงกด (Compression)

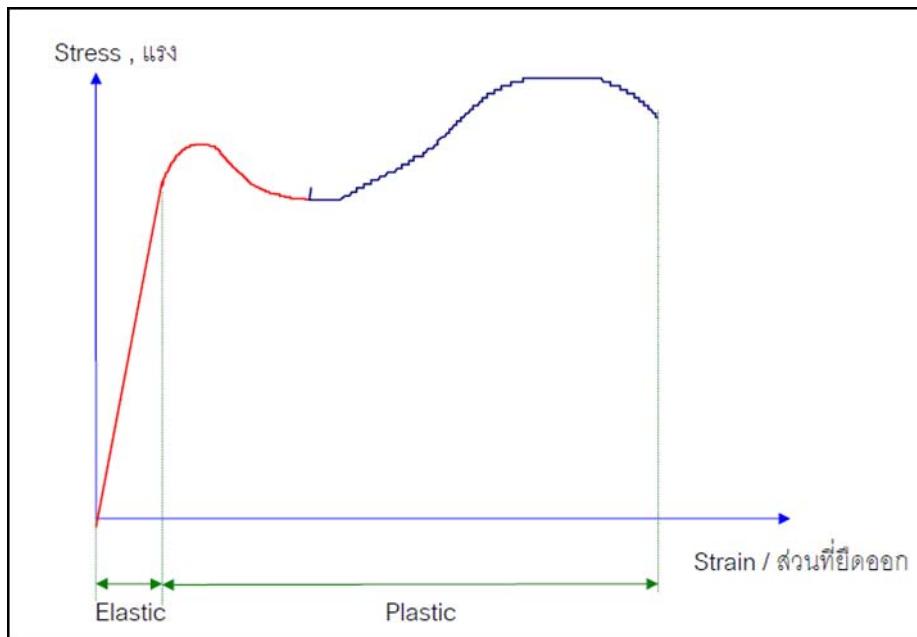
- ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูป มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน



รูปที่ 2.16 แรงเฉือน (Shear)

#### 2.2.14 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ



รูปที่ 2.17 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ

ก. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อน ไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

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

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งยืดหยุ่นจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม

การคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

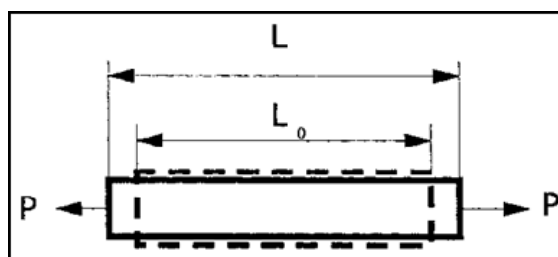
- แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากกระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 2.2 ค่าของความเครียดจะเท่ากับ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

เมื่อ  $e$  = ความเครียดเชิงเส้น

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

$L_0$  = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length

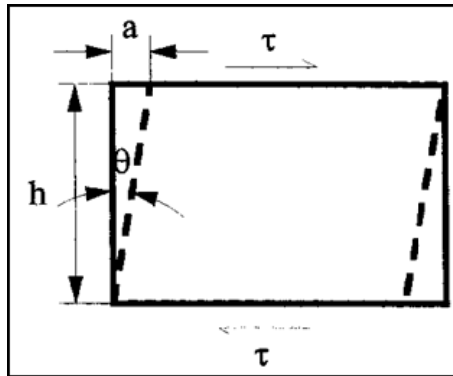


รูปที่ 2.18 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)

- แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ( $\tau$ ) ดังรูป ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

$$\gamma = \frac{a}{h}$$

เมื่อ  $\gamma$  =  $\tan \theta \approx \theta$  (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)  
 $a$  = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)  
 $h$  = ระยะห่างระหว่างระนาบ  
 $\theta$  = มุมที่เปลี่ยนไป

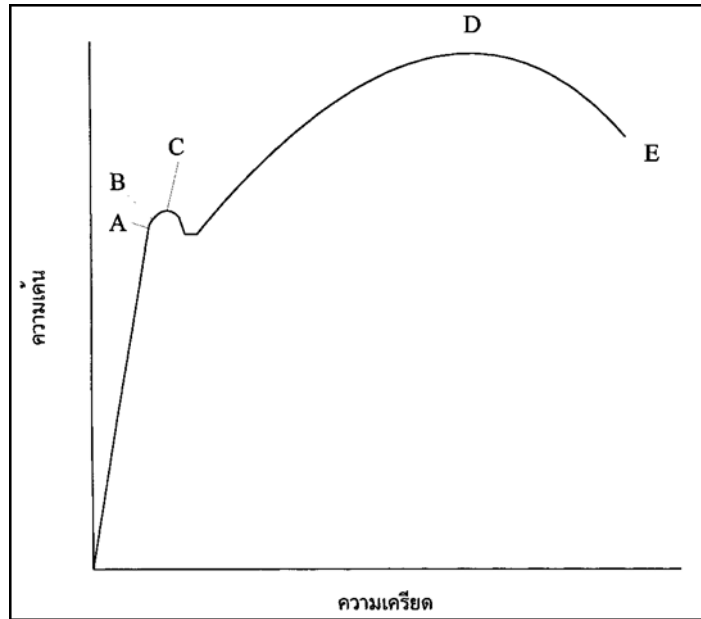


รูปที่ 2.19 ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

จะเห็นได้ว่าค่าของความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว

### 2.2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 2.7 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [7]

### 2.2.16 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation of material)

กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่ วัสดุได้รับแรงมากระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรูปร่าง ถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตาม มันก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

ก. สลลป (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัว หรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวของอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ ถึงแม้ว่าจะไม่มี ความเค้นใดๆ แต่ผลึกนั้นๆ ก็จะไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีกเลย

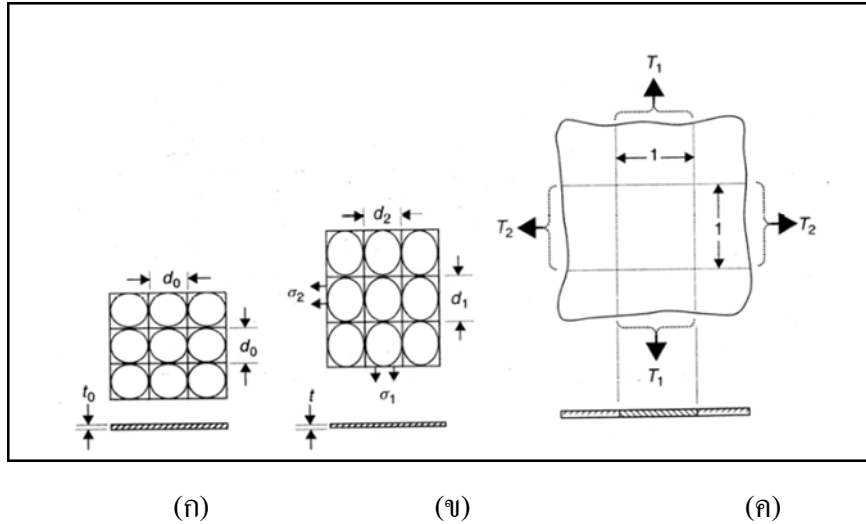
ข. ทวินนิง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูป อันเนื่องมาจากกระชากหรือ แนวของผลึกเกิดการถูกเฉือน ให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกันหรือเหมือนกัน โดยที่ ทิศทางการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลขที่เดียว

ค. ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรง มาจากภายนอกเข้ามามีการทำงานกระทำต่ออะตอมเกิดอาการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง

### 2.2.17 การวัดค่าอัตราความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปใน ภาพประกอบ 2.21 ลักษณะที่ยัง ไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา  $ot$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $od$  หรือตารางขนาด  $od$  แสดง

$\sigma_1$      $\sigma_2$



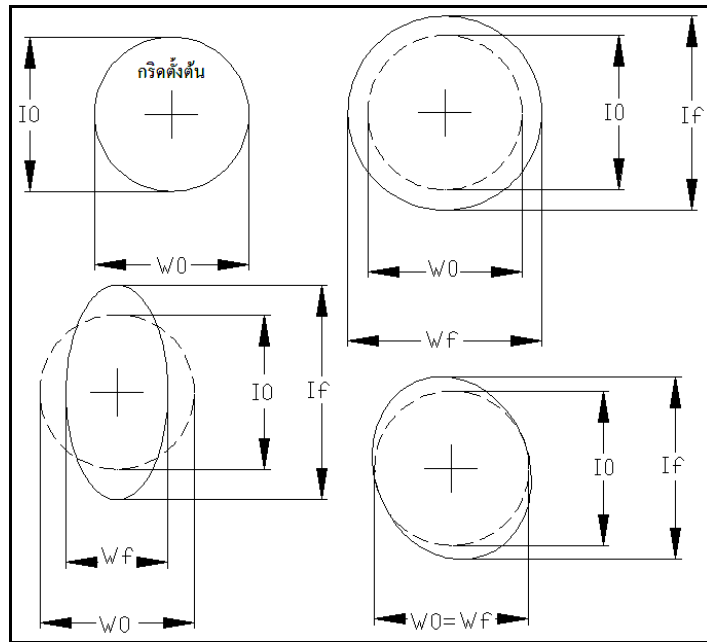
รูปที่ 2.21 ลักษณะตารางวงกลมกริดบนโลหะแผ่น [7] (ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลม (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ  $d1$  และขนาดแกนรอง คือ  $d2$  (ค) การดึง, T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง

ค่าความเครียดสูงสุดของความเครียดหลักและความเครียดรองสามารถกำหนดโดยการวัดความเครียดบนแผ่นโลหะด้วยการใช้ กริดวงกลม โดยการพล็อตความเครียดหลักสูงสุดลงมาถึงความเครียดหลักต่ำสุด ซึ่งหาได้จากกริดวงกลมเปลี่ยนรูปเป็นวงรีที่เกิดการคอดและการแตกหลังการยืดแบบสองแกนโดยการพล็อตเส้นโค้งรอบๆบริเวณการดึงและการกดโดยใช้การทดสอบทางเชิงกลที่แตกต่างกันอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

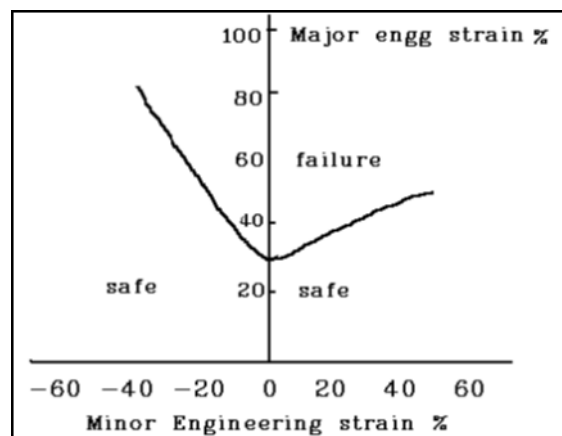
$$\% \text{ ความเครียดหลัก (Major strain)} = \frac{\text{ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนหลักเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$

$$\% \text{ ความเครียดรอง (Major strain)} = \frac{\text{ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนรองเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$



- โดย
- $I_0$  = ความยาวแกนหลักเดิม
  - $I_f$  = ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป
  - $W_0$  = ความยาวแกนหลักเดิม
  - $W_f$  = ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป

รูปที่ 2.22 การวัดอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดและอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดรองโดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



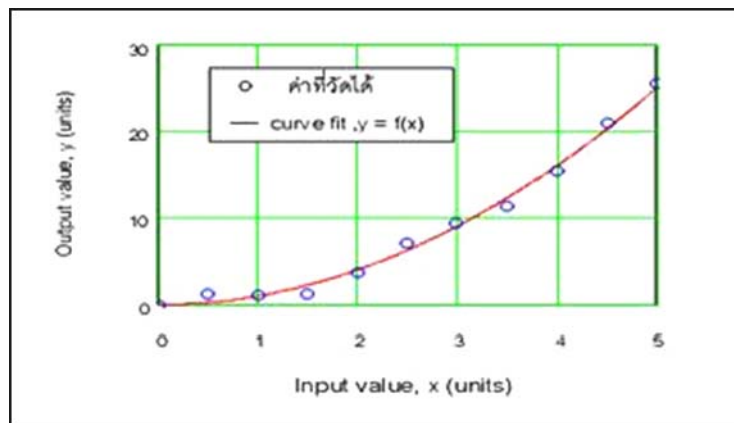
รูปที่ 2.23 ตัวอย่างแผนภาพแสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป [7]

### 2.2.18 ความเหนียว (Ductility)

เป็นค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %EI มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ, Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

### 2.2.19 การวัดแรง

ในการวัดแรงโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์แบบแบบสเตรนเกจ (Strain Gage) นั้น มีทฤษฎีในการทำงานดังนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะนั้นถูกกระทำภายใต้โหลด ซึ่งเป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการ วัดค่าความเครียด (Strain) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้การวัดแรงนั้นจะถูกเรียกว่า โหลดเซลล์ โดย โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ จะเปลี่ยนแรงที่มากระทำเป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องมือวัดแบบนี้ยึดติดกับ โครงสร้างที่มีการเปลี่ยนรูปเมื่อมีแรงหรือน้ำหนักมากระทำ ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว ในการวัดเพื่อให้ได้ความไวสูงสุดและมีการชดเชยผลของอุณหภูมิขณะทำการวัดด้วย เกจทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าชดเชยวงจร โดยทั่วไป เกจ 2 ตัวจะอยู่ในสภาพถูกดึงและอีก 2 ตัวอยู่ในสภาพถูกกด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียดจะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วน โดยตรงกับแรงที่มากระทำ



รูปที่ 2.24 กราฟตัวอย่างของค่า Static Sensitivity

จากกราฟข้างต้นเป็นกราฟตัวอย่างของค่า Static Sensitivity ค่า Static Sensitivity คือ ค่าอัตราส่วนระหว่าง Output ต่อ Input ซึ่งในที่นี้ค่า Output หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่ออกมา และค่า Input คือแรงที่กระทำกับตัว Load Cell ซึ่งจะต้องมา Plot กราฟอีกครั้งหลังจากการทดลอง

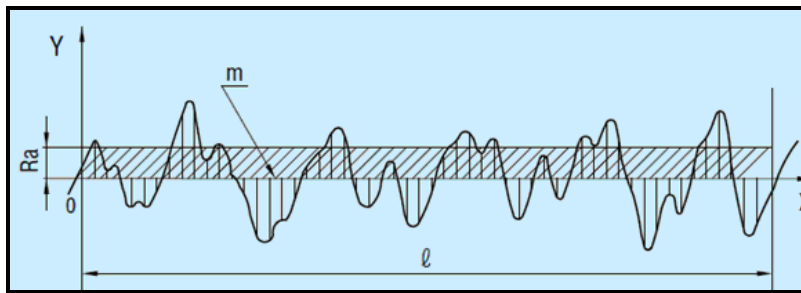


### 2.2.20 ความหยาบผิว

ความหยาบผิวสามารถวัดหรืออ่านค่าได้จากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น การอ่านค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (Ra) การอ่านค่าของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของความหยาบผิว (Ry) ตลอดจนการอ่านค่าเฉลี่ยของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด (Rq) ค่าความหยาบในแต่ละลักษณะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการใช้งาน โดยส่วนใหญ่มีกนิยกำหนดเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical Mean Roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| dx$$



รูปที่ 2.25 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) [8]

### 2.3 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ และยังมีปัจจัยต่างๆในการทำงานที่ต้องศึกษา เพื่อให้เกิดกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพและเป็นระเบียบแบบแผนในการทำงาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการ โดยมีงานวรรณกรรมที่น่าสนใจในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ดังนี้

P.A.F.Martin , N.Bay , M Skjoedt , M.B Silva[9] ได้ทำการศึกษาทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์รูปแบบด้วยการขึ้นรูปแบบขึ้นพื้นฐานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และอธิบายผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยที่ในเวลา สองถึงสามปีที่ผ่านมา โดยใช้พื้นฐานรูปแบบในการวิเคราะห์ แบบ membrane โดยมีแรงเสียดทานในหลายแนวแกนในแนวระนาบ

Kathryn Jackson ,Julian Allwood[10] ได้ทำการศึกษา ลักษณะของกลศาสตร์ในการขึ้นรูปของกระบวนการขึ้นรูป แบบต่อเนื่อง โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด และนำผลต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบกัน

F.Micari , G.Ambrogio , L.Filice[11] ได้ทำการศึกษาลักษณะของ ความเที่ยงตรงของ รูปร่างและขนาดในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยพบว่า ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับสัดส่วนความหนาของวัสดุ ที่แปรผันกัน มีผลต่อ ความเที่ยงตรงของ รูปร่างและขนาดที่ได้ทำการขึ้นรูป

Joost Duflou, Yasemin Tunckol ,Alex Szekeres, Paul Vanherck[12] ได้ทำการทดลอง ศึกษาการวัดแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยปัจจัยในลักษณะต่างๆเช่นระยะการกดในแนวแกน Z,ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ,ความหนาของวัสดุ, มุมในการขึ้นรูป,รูปทรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและสารหล่อลื่นประเภทต่างๆ

J.Kopac , Z.Kampus[13] ได้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องกัด CNC ในกระบวนการขึ้นรูป และควบคุมเส้นทางการเดินทางของอุปกรณ์ที่ใช้การขึ้นรูปโดยระบบ Computer aids Manufacturing พบว่า อุปกรณ์จับยึดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องควรเปลี่ยนไปโดยมีความสัมพันธ์กันกับรูปร่างพื้นฐานที่ทำการออกแบบไว้และ แสดงถึงความสัมพันธ์ของมุมในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความลึกของ ชิ้นงาน อีกด้วย

J. Jeswiet[4] ได้ทำการศึกษาวิธีการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และได้้นำระบบ คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต มาช่วยในกระบวนการทำงาน ทำให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Meiler, M., Pfestorf, M. และ Geiger M. [7] และ Yang, T.S. [14] ได้นำเอาสารหล่อลื่นแผ่นชนิดแห้ง (Dry filme lubricants) มาใช้ในงานลากขึ้นรูปลิกอะลูมิเนียม เพื่อช่วยลดการสึกหรอของแม่พิมพ์ และพบว่าสารหล่อลื่นชนิดแห้งมีข้อดีกว่าน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากทำให้สามารถทำการลากขึ้นรูปได้ดีกว่า

L. Fratini G Ambrogio,R Di Lorenzo, L.Filice, F. Micari[1] ได้ศึกษาการเลือกใช้วัสดุแผ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ค่าความเครียดแข็งและ ค่าเปอร์เซ็นต์ การยึดตัวของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

M.Durante, A.Formisano ,A.Langella, F Mimola Capece Minutolo[15] ได้ทำการศึกษา ถึงทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพ ของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดด้วยการกำหนดตัวแปรในการทดสอบด้วย ความเร็วละทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ พบว่าความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์มีผลต่อค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะแผ่น

## 2.4 สรุปบท

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรเฉพาะจุด บนแผ่นโลหะโดยการใช้อุปกรณ์ในการขึ้นรูป ทรงครึ่งวงกลม ทำการหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด แล้วทำการกดลง บนพื้นผิวของแผ่นโลหะ จนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรเฉพาะจุด เกิดขึ้น ดังนั้นวัสดุที่จะใช้การขึ้นรูปด้วย กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดนั้นควรจะเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยืดตัวสูง ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ในการขึ้นรูปนั้นควรเป็นวัสดุที่มีแข็งสูงและทนทานในการเสียดสีที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างอุปกรณ์ในการขึ้นรูปและแผ่นโลหะ โดยผลลัพธ์ที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการขึ้นรูป, อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นพื้นผิวของแผ่นโลหะ และอัตราความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นโลหะหลังการขึ้นรูป

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด (Single Point Incremental Forming Process) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ทองเหลือง โดยจากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยหลักที่ผลต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นจะอยู่ในรูปของ แรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูป และคุณภาพของผิวงาน อยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย และวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

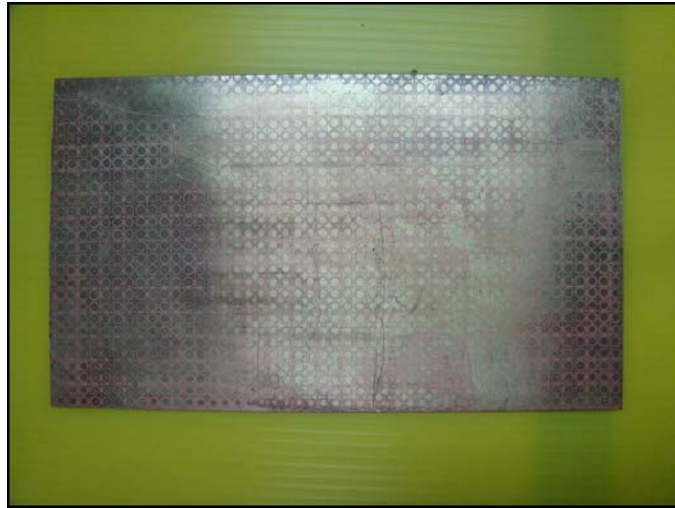
จากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่า กระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก แต่พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูป [7] ได้แก่พารามิเตอร์ของ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์ เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสถานะการทำงานในกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะทำการศึกษา ความเที่ยงตรงของชิ้นงานที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป และแรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูป และศึกษาคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็น แผ่นทองเหลือง ที่มีส่วนผสม Cu เท่ากับ 61.34 เปอร์เซ็นต์ และ Zn เท่ากับ 38.4 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 0.6 มิลลิเมตรและ วัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูปจะเป็น โลหะสำหรับใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11

การดำเนินการ	ระยะเวลาในการดำเนินการ											
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.		
1. ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น												
2. ออกแบบการทดลอง												
3. ผลิตชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับใช้ในกระบวนการขึ้นรูป												
4. ทำการทดลองและเก็บข้อมูลตามตัวแปรที่ได้กำหนด												
5. ทำเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จาก Experiments												
6. สรุปผลการทดลอง												
7. นำเสนอผลการทดลอง												
8. จัดพิมพ์รูปเล่มวิทยานิพนธ์												

รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นงานทดสอบแผ่นโลหะทองเหลือง โดยทำการตัดให้มีขนาดความกว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตรหนา 0.6 มิลลิเมตร โดยมีความหยาบผิวเฉลี่ย เท่ากับ 0.3 Ra



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานแผ่นทองเหลือง

โดยวัสดุทองเหลืองแผ่นที่นำมาใช้เป็นวัสดุในการทดลองจะมีค่าส่วนผสมองค์ประกอบทางเคมีดังและคุณสมบัติทางกลต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดลอง

ธาตุ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (% wt )
Mg	0.04
Al	0.02
Si	0.03
P	0.03
Si	0.02
Cl	0.07
Ca	0.01
Fe	0.01
Ni	0.02
Cu	61.34
Zn	38.4
รวม	100

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดลอง

Specimen	Longitudinal	Transverses
Thickness (mm)	0.63	0.66
Width (mm)	12.51	12.35
Cross section (mm <sup>2</sup> )	7.88	8.15
Load at 0.2 % offset yield strength (N)	1,569	1,567
Maximum tensile load (kN)	3.274	3.108
0.2 % offset yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	199.15	192.29
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	415.48	381.35
Elongation (%)	31.60	29.66
Location of fracture	In the length	In the length

ที่มา : นำมาจากข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางเคมี (ภาคผนวก ค)

### 3.2.2 เตรียมวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

เตรียมวัสดุโลหะเหล็กกล้าเครื่องมือ ตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร โดยที่ปลายมีรูปร่างครึ่งวงกลม รัศมี 10 มิลลิเมตร [11] ด้วยเครื่องกลึง CNC Turning เพื่อให้อุปกรณ์มีขนาดของรัศมีเท่ากันทั้งหมด โดยมีความหยาบผิว เท่ากับ 0.7 Ra



(ก)



(ข)

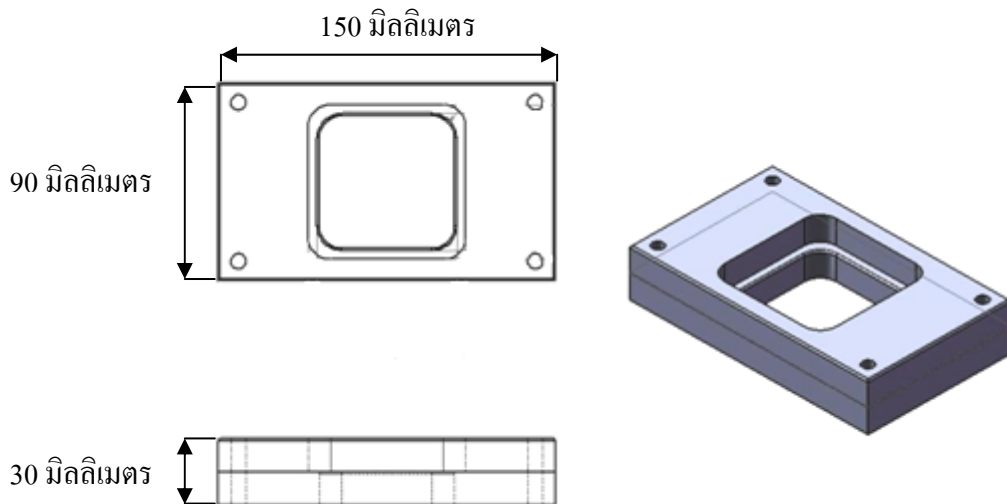


(ค)

รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูป (ก) แท่งเหล็ก เกรด SKD 11 สำหรับทำ (ข) กลึงปอกและปาดหน้าด้วยเครื่องกลึง CNC Turning (ค) แท่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการกลึง

### 3.2.3 สร้างอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ

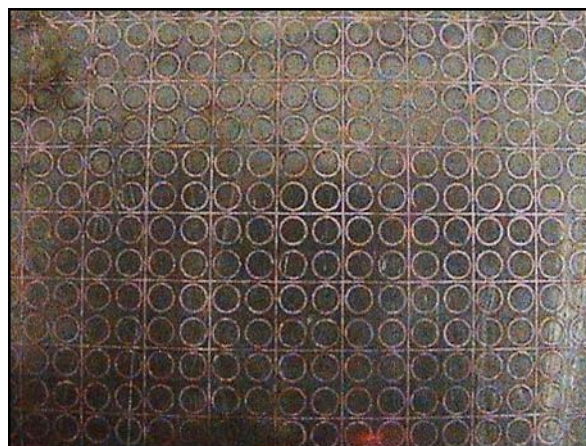
อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้โลหะ เหล็กมาตรฐาน JIS เกรด S50C โดยใช้เครื่องจักร CNC ในการสร้าง ให้มีขนาดกว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร [10]



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ

### 3.2.4 เตรียมวัสดุโลหะแผ่นทองเหลืองตีกริดวงกลมโดยใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า

กระบวนการตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้าเป็นการชุบเคลือบผิววัสดุทำให้เกิด ลายตาราง เพื่อทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังจากที่ชิ้นงานได้ผ่านการขึ้นรูป [13]



รูป 3.5 แผ่นทองเหลืองที่ผ่านการ ตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า



โดยการสร้างกริดวงกลมขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้ามีกระบวนการดังต่อไปนี้คือ

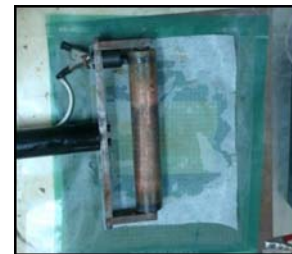
1. นำแผ่นเหล็กมารองขึ้นทดสอบวางบนโต๊ะปฏิบัติงาน
2. ประกอบตัวปรับแรงดันและแปลงไฟโดยให้กำหนดให้สายดินหนีบกับแผ่นเหล็กรองและ อีกสายหนึ่งติดลูกกลิ้ง
3. นำแผ่นโลหะทองเหลืองที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบที่จะใช้ในรูปบนแผ่นเหล็กรองอีกทีหนึ่ง โดยแผ่นชิ้นงานจะต้องผ่านการแต่งครีบและขอบ พร้อมกับล้างคราบไขมันให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้งและระวังอย่าให้มีเศษโลหะหรือวัสดุใดๆ เพราะจะทำให้ แผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils ) เกิดทะลุได้ในขณะใช้ลูกกลิ้งกดขณะขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า
4. นำแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils ) วางบนชิ้นงาน โดยจัดให้เหมาะสมกับชิ้นงาน
5. นำแผ่นเบาะรองที่จุ่มด้วยน้ำยา อิเล็กโทรไลต์ หมาดๆ เช็ดบนแผ่นแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ในบริเวณที่จะตีกริดให้ทั่วถึง โดยให้หมาดๆ ก็พอ แล้วจัดแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils ) ให้ตั้งอย่าให้ขยับ
6. นำแผ่นเบาะรองจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์และบิดพอให้เปียกๆ วางบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) อีกทีหนึ่ง ในกรณีที่แผ่นเบาะรองยังจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ก็ยังไม่ต้องจุ่มน้ำยาจนกว่าจะแห้งพอประมาณ
7. เปิดสวิตซ์ที่เครื่องปรับไฟ ปรับตั้งขนาดไฟฟ้าให้เหมาะสม ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนแผ่นเบาะรองด้วยน้ำหนักพอประมาณและเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆ เพียงครั้งเดียวซึ่งสังเกต โดยให้เข็มวัดกระแสไฟฟ้ากระดิกมาที่กึ่งกลางหรือสูงกว่าของมาตรวัด จะทำให้ กริดวงกลมบนแผ่นโลหะมีความชัดเจนและเส้นมีความคมสวยงาม หลังจากนั้นจึงปิดสวิตซ์ไฟแล้วนำแผ่นเบาะรองและStencils ออกเพื่อดูว่า กริดวงกลมมีความชัดเจนหรือไม่



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.6 กระบวนการกรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า (ก) แผ่น stencil ขนาด 10 x 12 นิ้ว  
(ข) เครื่องปรับแปลงไฟที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน (ค) ลักษณะการขึ้นรูปกริดวงกลมโดยใช้ลูกกลิ้งกด

8. หลังจากตีกริดวงกลมเสร็จแล้วให้นำแผ่นทดสอบมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาดและเช็ดให้แห้งแล้วพ่นน้ำยากัดสนิม เพื่อรอการขึ้นรูปต่อไป

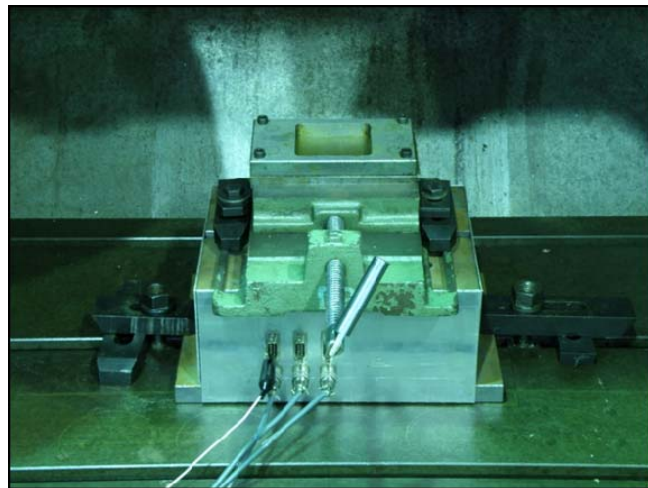
### 3.2.5 ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงเพื่อบันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป

ก. ในการวัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปนั้นจะทำการวัด โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงประเภท Load cell โดยในการติดตั้งนั้นจะทำการยึดอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะทองเหลืองเข้ากับอุปกรณ์วัดแรง ดังรูป



(ก)

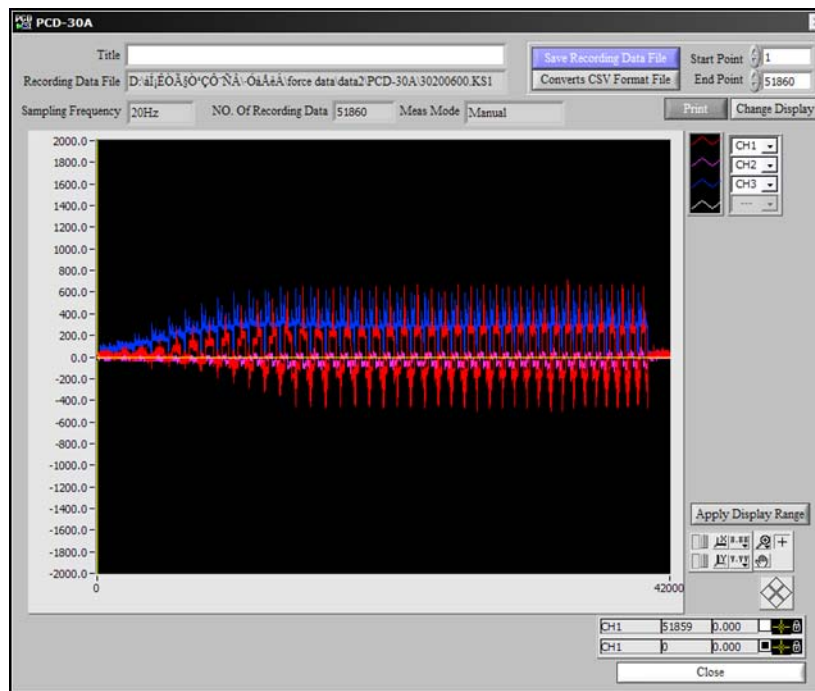
รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป(ก) อุปกรณ์วัดแรงและอุปกรณ์บันทึกผลที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป



(ข)

รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป (ข) การติดตั้งนั้นจะทำการยึดอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะทองเหลืองเข้ากับอุปกรณ์วัดแรง (ต่อ)

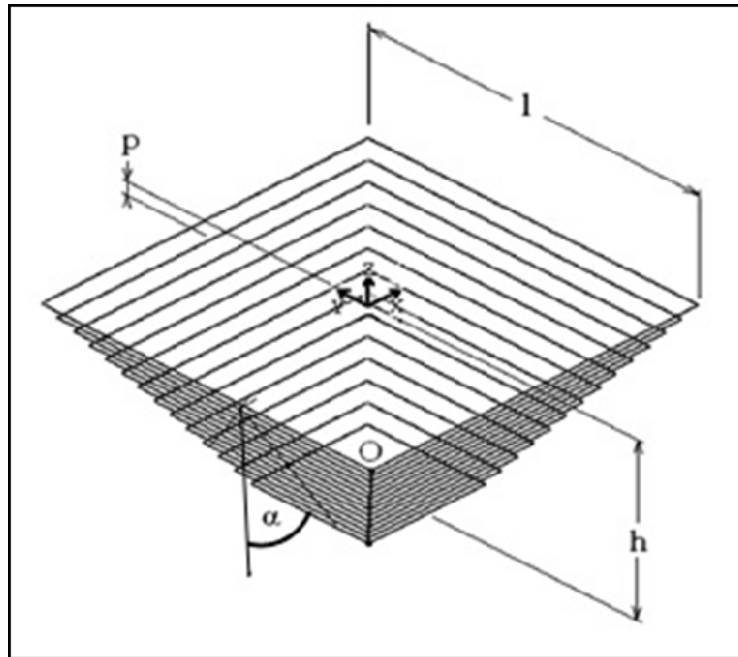
ข. ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงเข้ากับอุปกรณ์บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้น โดยเชื่อมต่อด้วยอุปกรณ์บันทึกผลเข้ากับคอมพิวเตอร์ PC เพื่อบันทึกค่าที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.8 ลักษณะการบันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป

### 3.2.6 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบนี้ จะใช้การขึ้นรูปทรง ที่ง่ายต่อการขึ้นรูป โดยในการทดสอบจะทำการขึ้นรูปโดยมีรูปทรงแบบ พีรามิดหัวตัด โดยฐาน ของพีรามิดเป็น สี่เหลี่ยมด้านเท่าขนาด 58 x 58 มม โดยในการทดลองจะมีกำหนดเส้นทางการเดินขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรมช่วยในการผลิต( CAM) ทำการกำหนดเส้นทางการทำงานที่เกิดขึ้น และมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป (Angle forming), ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (Speed), ความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (Feed) ดังรูปที่ 3.4 [11]



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)	100,200,400
Speed (rpm/min)	200,400,800

รูปที่ 3.9 แสดงมุม ,เส้นทางการเดิน และ ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป

โดยในการทดลอง จะกำหนดให้มีการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดในการทำงานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ตารางการใช้จ่ายการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่ มิลลิเมตรต่อนาที	มุม 30 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100	X	Y	Z
200	X	Y	Z
300	X	Y	Z

ตารางที่ 3.4 ตารางการใช้จ่ายการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่ มิลลิเมตรต่อนาที	มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป 40 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100	X	Y	Z
200	X	Y	Z
300	X	Y	Z

ตารางที่ 3.5 ตารางการใช้จ่ายการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่ มิลลิเมตรต่อนาที	มุม 50 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100	X	Y	Z
200	X	Y	Z
300	X	Y	Z

### 3.2.7 วิธีการทดลองและบันทึกข้อมูล

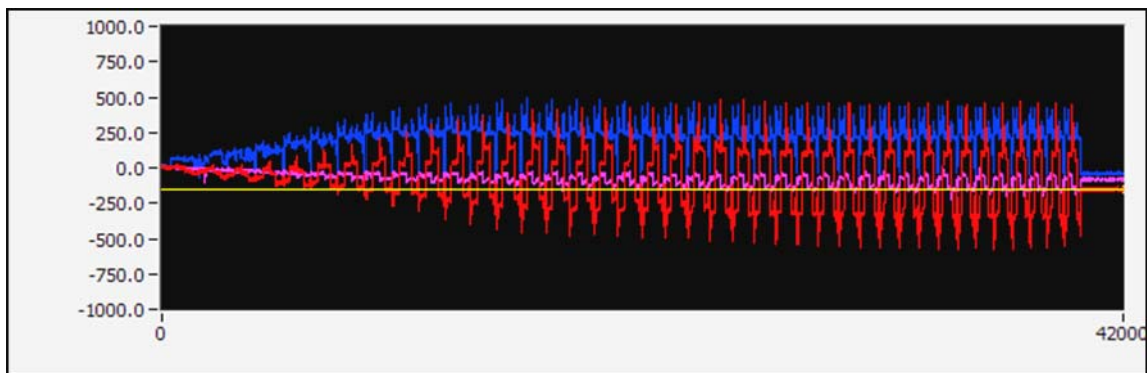
การทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน โดยจะทำการติดตั้งระบบจับยึดแผ่นโลหะ โดยระบบจับยึดแผ่นโลหะจะมีการกำหนด พื้นที่ช่องว่างเพื่อให้แผ่นโลหะเปลี่ยนไปตามรูปแบบที่กำหนด หลังจากทำการทดลองเสร็จแล้วจะต้องบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.10 เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน

#### ก. บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป

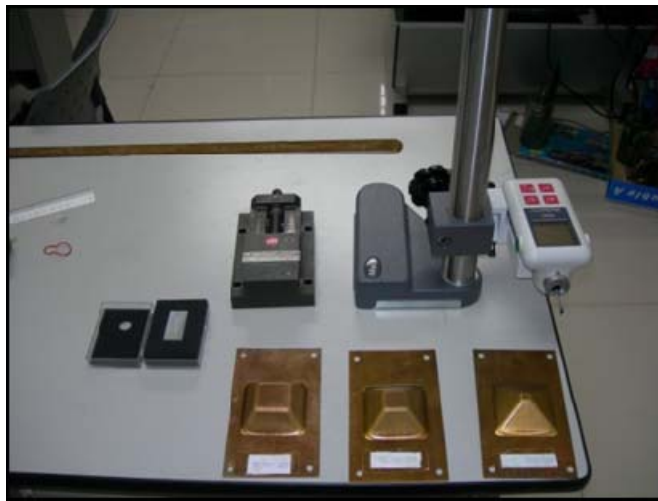
บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้น จากการที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ได้กดสัมผัสพื้นผิวของแผ่น โลหะทองเหลืองในแต่ละชั้นของการกดขึ้นรูปเพื่อให้ทราบถึงแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกนในกระบวนการขึ้นรูป



รูปที่ 3.11 หน้าจอแสดงแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป

ข. บันทึกค่าความหยาบผิวเฉลี่ย(Ra)

สภาพพื้นผิวที่เกิดจากการกดขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นขั้นตามจำนวนของการขึ้นรูป ซึ่งหลังจากทำการขึ้นรูปแล้ว จะนำชิ้นงานมาวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ด้วยฟังก์ชัน Ra โดยใช้ระยะ Cut off 5 x 0.8 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนในการวัดผิวชิ้นงานดังนี้คือ ทำความสะอาดผิวชิ้นงานโดยการล้างคราบจารบีออก แล้วจึงวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยทำการวัดจำนวน 3 ครั้งในแต่ละด้านของรูปทรงปริมาตรหัวตัดที่ทำการขึ้นรูป แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความหยาบผิวเฉลี่ยยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS 1

ค. การคำนวณ เปอร์เซ็นต์การลดรูปหลังจากการทำการขึ้นรูป

การคำนวณ เปอร์เซ็นต์การลดรูปหลังจากทำการขึ้นรูปด้วยมุมที่กำหนด คือ 30 องศา 40 องศา และ มุม 50 องศา

โดยเปอร์เซ็นต์การลดรูปสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\% \text{ Reduction} = \frac{D-d}{D} \times 100$$

โดย D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนลากขึ้นรูป

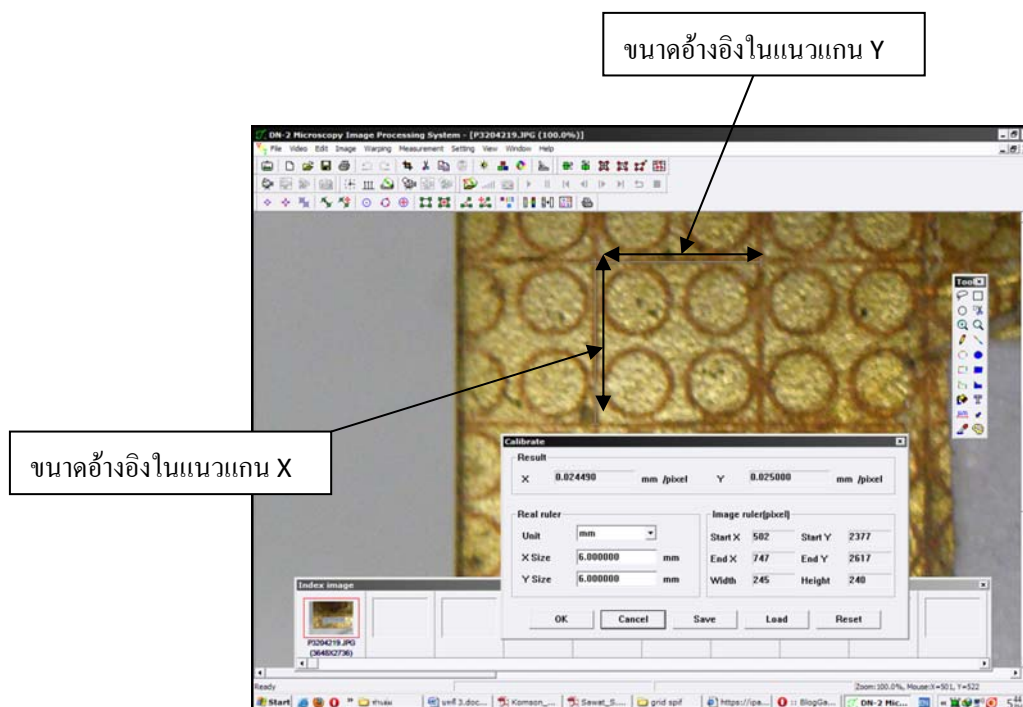
d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ลากขึ้นรูปแล้ว

### ง. วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน

การวัดค่าเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานตามแนวแกน X และแนวแกน Y จะกระทำโดยการวิเคราะห์กริดวงกลมที่ทำการกักรวดเกลือไว้ที่ระยะห่างอย่างสม่ำเสมอ มีขนาดวงกลมเท่ากันขนาดผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร โดยหลังการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นทองเหลืองจะเปลี่ยนรูปเป็นวงรี วัดขนาดของวงรีเพื่อกำหนดขนาดโตสุด(ความเครียดหลัก)และขนาดต่ำสุด(ความเครียดรอง) ความเครียดทั้งสองนี้จะถูกพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

โดยขั้นตอนวัดขนาดกริดจากการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลัก (Major strain) และความเครียดรอง (Minor strain) ซึ่งมีวิธีการวัดดังนี้

1. ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ ทำการถ่ายภาพขนาดกริดมาตรฐานก่อนทำการขึ้นรูป ที่ระยะโฟกัสเดียวกันชิ้นงานทดลอง เพื่อทำการกำหนดให้เป็นขนาดอ้างอิงในโปรแกรม สำหรับใช้ในการวัดขนาด วงกลมกริดที่เปลี่ยนไป

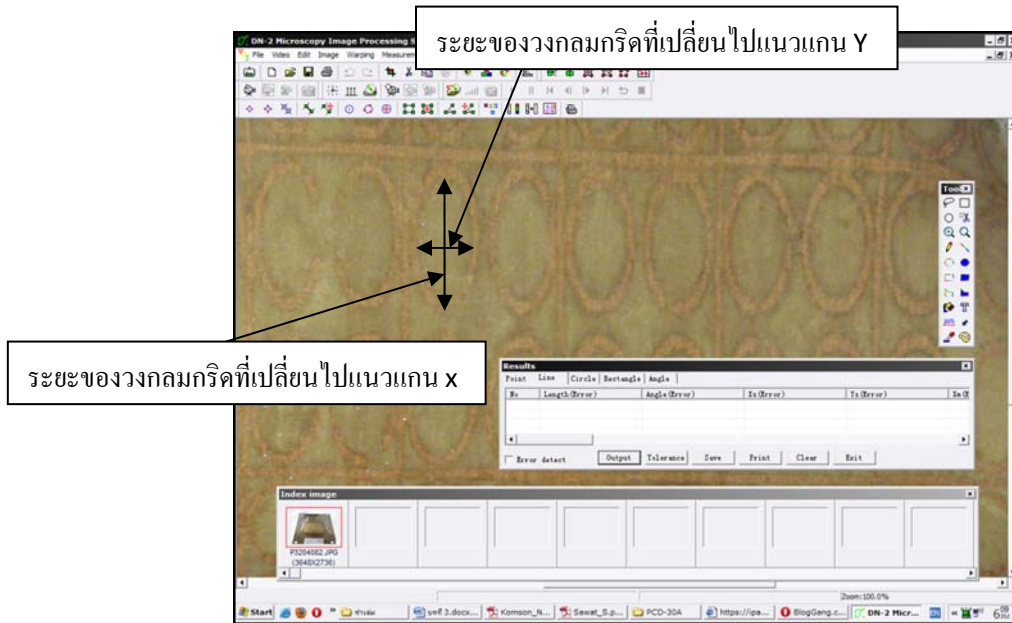


รูปที่ 3.13 รูปการกำหนดขนาดอ้างอิงของกริดมาตรฐาน

2. ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ โดยให้ขณะที่ถ่ายภาพ พื้นผิวของแผ่นทองเหลืองที่จะทำการถ่ายภาพจะต้องได้รับการปรับให้ขนานกับหน้ากล้อง Microscope โดยให้ระยะโฟกัสที่ทำการถ่ายภาพ กริดนั้นจะต้องเท่ากันในทุกชิ้นงานทดลอง

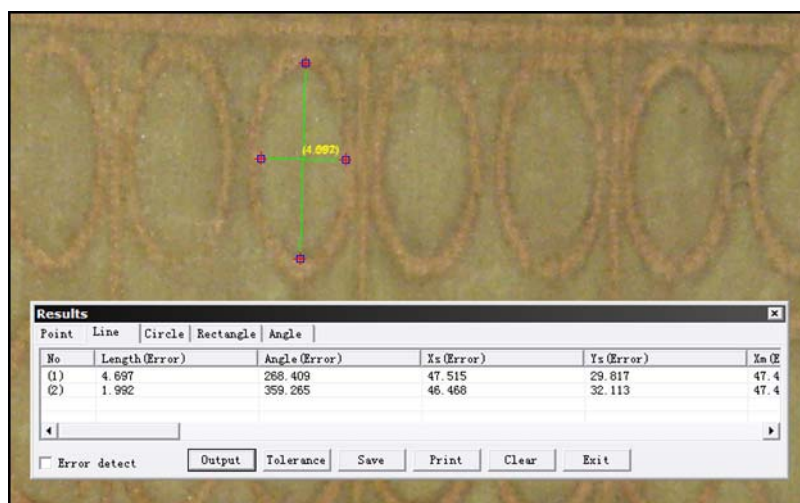


3. เลือก กริดวงกลม ที่เกิดการเปลี่ยนขนาดของวงกลมกริด เป็นวงรีในแต่ละชั้น การทดลองแล้ว นำมาสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน



รูปที่ 3.14 รูปการสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน

4. ทำการวัดขนาด กริดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Dcal ImageProcessing วัดขนาดกริดในแนวตั้งและแนวนอนแล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก



รูปที่ 3.15 รูปการวัดขนาดกริดในแนวตั้งและแนวนอน

อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

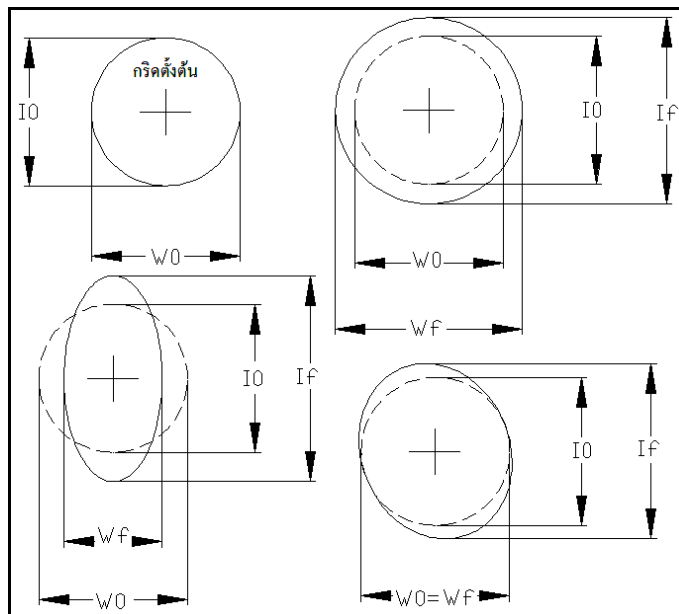
$$\% \text{ ความเครียดหลัก (Major strain)} = \frac{\text{ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนหลักเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$

$$\% \text{ ความเครียดรอง (Minor strain)} = \frac{\text{ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนรองเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$

โดย

$I_0$	=	ความยาวแกนหลักเดิม
$I_f$	=	ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป
$W_0$	=	ความยาวแกนหลักเดิม
$W_f$	=	ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป

โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลมดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การวัดอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดและอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดรอง

- นำความเครียดหลัก (Major strain) และความเครียดรอง (Minor strain) มาพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel
- ปรับปรุงและแก้ไขผลการวิจัยหรือข้อบกพร่องต่างๆ
- สรุปผลการวิจัยและนำเสนอผลงาน

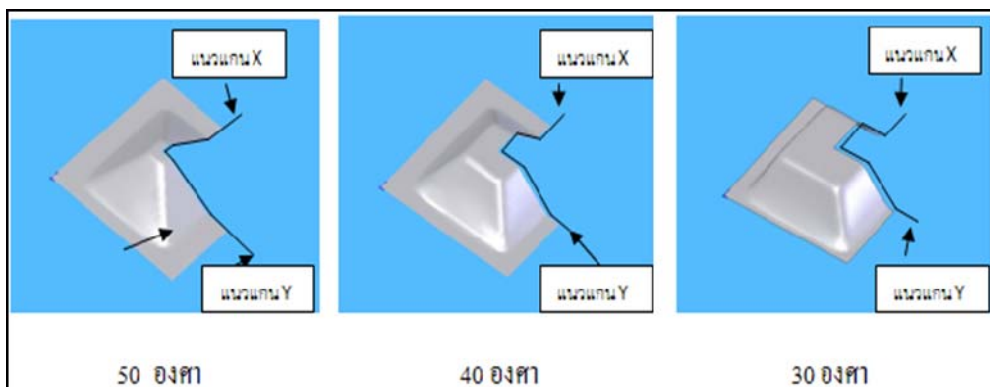
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งประกอบวัสดุโลหะตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ในการขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด บนวัสดุชิ้นงานทองเหลือง โดยการปรับค่าปัจจัยที่ใช้ในการทำงาน ได้แก่ปัจจัยของ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ การ จะทำการศึกษา แรงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูป และศึกษาคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยผลการทดลองที่แสดงในบทนี้จะเป็นผลการทดลองที่ได้ทำการคำนวณค่าจากข้อมูลดิบในภาคผนวก ก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ผลกระทบในการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งแบ่งผลการทดลองตามตัวแปรและขนาดของมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป

#### 4.1 ผลการทดลอง

การทดลองปรับค่าปัจจัยขนาดของมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปในรูปที่ 4.1 เป็นการทดสอบ เพื่อศึกษาการทำงาน และผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดโดยควบคุมปัจจัย ตามรูปที่ 3.8 โดยจากการทดลองทำให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีส่งผลกระทบต่อค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำงานซึ่ง จะอยู่ในรูปของ การศึกษาแรงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูป, คุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 4.1 รูปลักษณะการขึ้นรูปเพื่อความเครียดผิวที่ มุม 30,40 และ 50 องศา

#### 4.1.1 เวลาที่ใช้ในการทดลองการ

โดยในการทดลองในแต่ละปีจจัยจะมีการใช้เวลาในการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งแปรผันไปตามความเร็วในการเคลื่อนที่ของ อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (Feed) ซึ่งเราสามารถหาได้จากการจำลองการทำงานด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) ผลการบันทึกเวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละปีจจัยการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

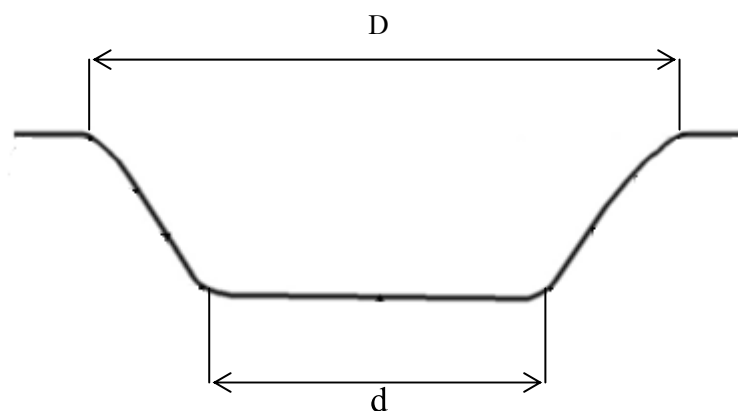
ตารางที่ 4.1 ผลการบันทึกเวลาที่ใช้ในการทดลอง โดยการขึ้นรูปที่มุม 30,40 และมุม 50 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป		
	30 องศา	40 องศา	50 องศา
100 มิลลิเมตรต่อนาที	71 นาที	64 นาที	55 นาที
200 มิลลิเมตรต่อนาที	38 นาที	34 นาที	29 นาที
300 มิลลิเมตรต่อนาที	27 นาที	24 นาที	21 นาที

#### 4.1.2 เพอร์เซ็นต์การลดรูป

โดยเปอร์เซ็นต์การลดรูปสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

- โดย  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนลากขึ้นรูป  
 $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ลากขึ้นรูปแล้ว



รูปที่ 4.2 รูปลักษณะของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนลากขึ้นรูปและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ลากขึ้นรูปแล้ว

โดย D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนลากรูปร่าง  
d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ลากรูปร่างแล้ว

$$\% \text{ Reduction} = \frac{D-d}{D} \times 100$$

จากสูตร เราสามารถหาเปอร์เซ็นต์การลดรูปในแต่ละมุมที่ทำการขึ้นรูปได้ดังนี้ โดย

$$D = 58 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{มุม 30 องศา } d = 34.90 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{มุม 40 องศา } d = 24.43 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{มุม 50 องศา } d = 10.33 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา } \% \text{ Reduction} = \frac{58-34.90}{58} \times 100$$

$$\% \text{ Reduction} = 39.82 \%$$

$$\text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา } \% \text{ Reduction} = \frac{58-24.43}{58} \times 100$$

$$\% \text{ Reduction} = 57.86 \%$$

$$\text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา } \% \text{ Reduction} = \frac{58-10.33}{58} \times 100$$

$$\% \text{ Reduction} = 82.18 \%$$

จากการคำนวณ พบว่า เปอร์เซ็นต์การลดรูปใน ที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยการสัมผัสเป็นจุด ที่มุมต่างๆที่ไซในการขึ้นรูปคือ

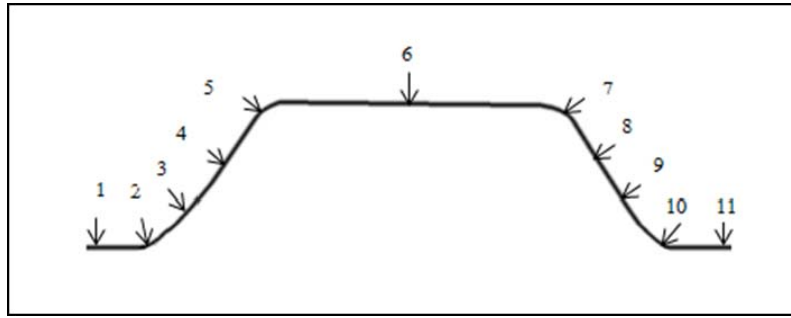
$$\text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา เปอร์เซ็นต์การลดรูป} = 39.82 \%$$

$$\text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา เปอร์เซ็นต์การลดรูป} = 57.86 \%$$

$$\text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา เปอร์เซ็นต์การลดรูป} = 82.18 \%$$

#### 4.1.3 ผลการวัดความหนาของผนังชิ้นงานที่เปลี่ยนไปหลังการขึ้นรูป

ก. จากการทดลองขึ้นรูป แผ่นทองเหลืองให้มีลักษณะเป็นรูปปิรามิดหัวตัว ตามมุมที่กำหนด คือ มุม 30 องศา และทำการวัดความหนา ตามภาคตัดขวาง ตามจุดที่กำหนดดังต่อไปนี้



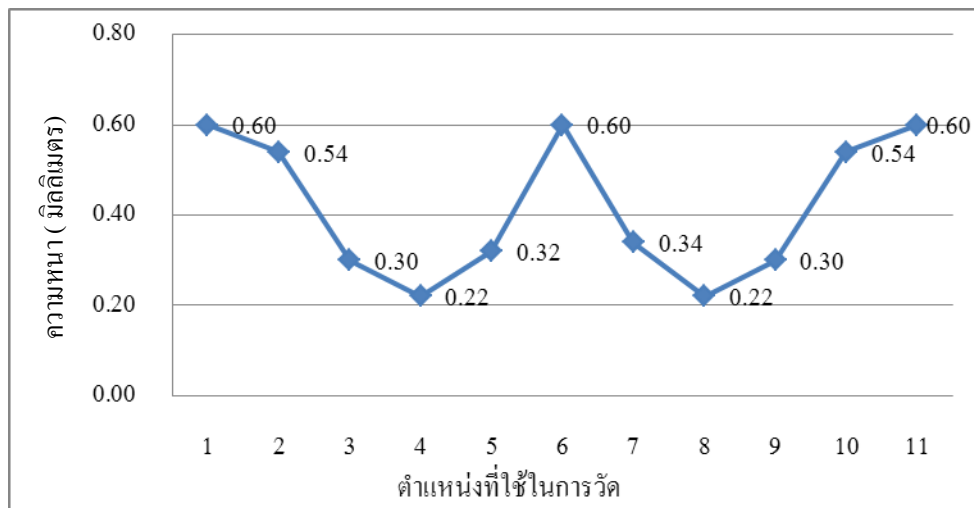
รูปที่ 4.3 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.60	0.54	0.30	0.22	0.32	0.60	0.34	0.22	0.30	0.54	0.60

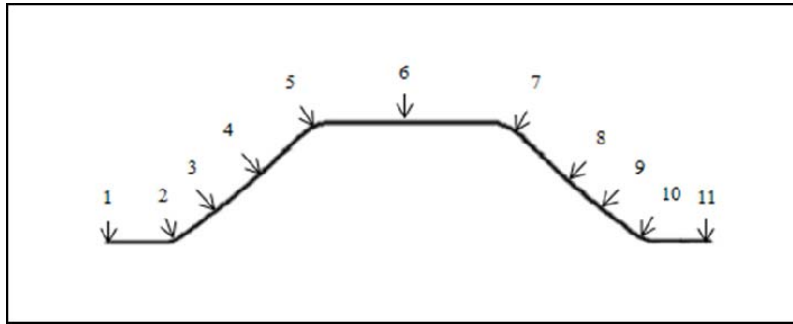
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.6 (ภาคผนวก ก)

จากการทดลองวัดความหนาสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาสร้างกราฟแสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในการขึ้นรูปได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ข. จากการทดลองขึ้นรูป แผ่นทองเหลืองให้มีลักษณะเป็นรูปปิรามิดหัวตัว ตามมุมที่กำหนด คือ มุม 40 องศา และทำการวัดความหนา ตามภาคตัดขวาง ตามจุดที่กำหนดดังต่อไปนี้



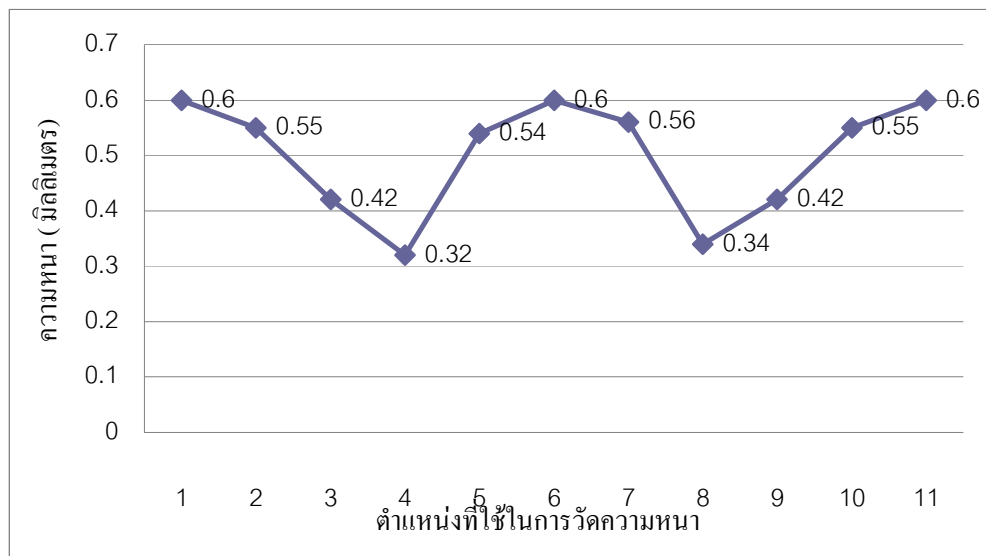
รูปที่ 4.5 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.6	0.55	0.42	0.32	0.54	0.60	0.56	0.34	0.42	0.55	0.60

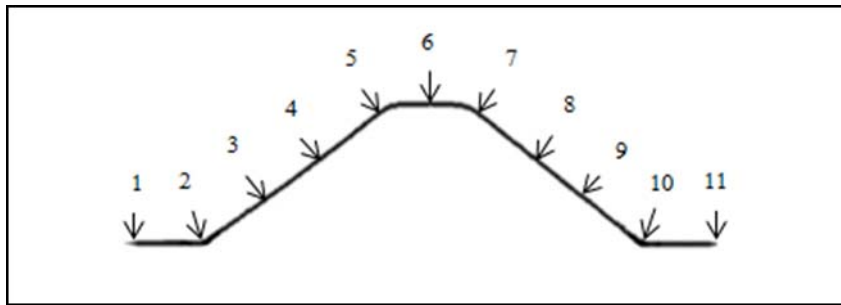
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.6 (ภาคผนวก ก

จากการทดลองวัดความหนาสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาสร้างกราฟแสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในการขึ้นรูปได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ง. จากการทดลองขึ้นรูป แผ่นทองเหลืองให้มีลักษณะเป็นรูปปริมาตรหัวตัว ตามมุมที่กำหนด คือ มุม 50 องศาและทำการวัดความหนา ตามภาคตัดขวาง ตามจุดที่กำหนดดังต่อไปนี้



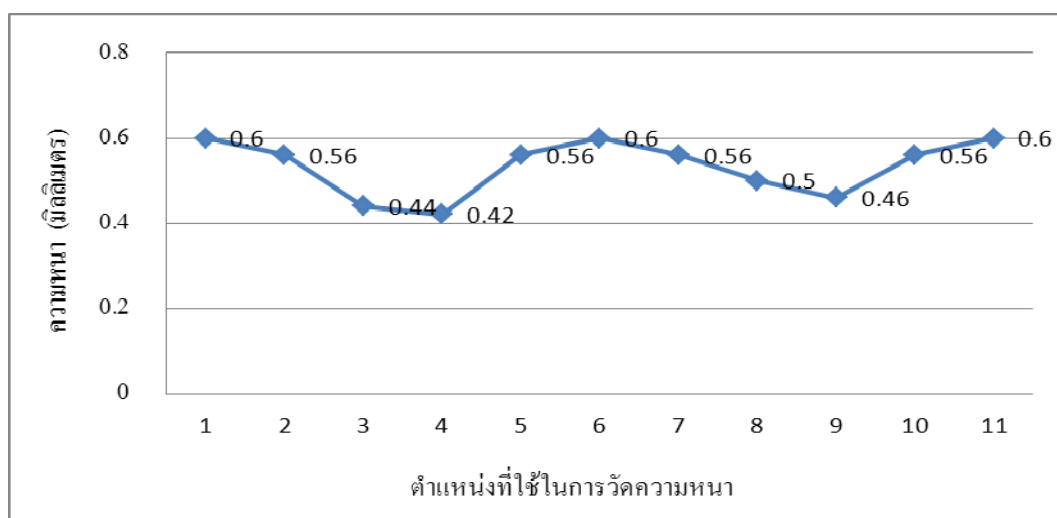
รูปที่ 4.7 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ความหนา(มิลลิเมตร)	0.60	0.56	0.44	0.42	0.56	0.60	0.56	0.50	0.46	0.56	0.60

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.6 (ภาคผนวก ก

จากการทดลองวัดความหนาสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาสร้างกราฟแสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในการขึ้นรูปได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา



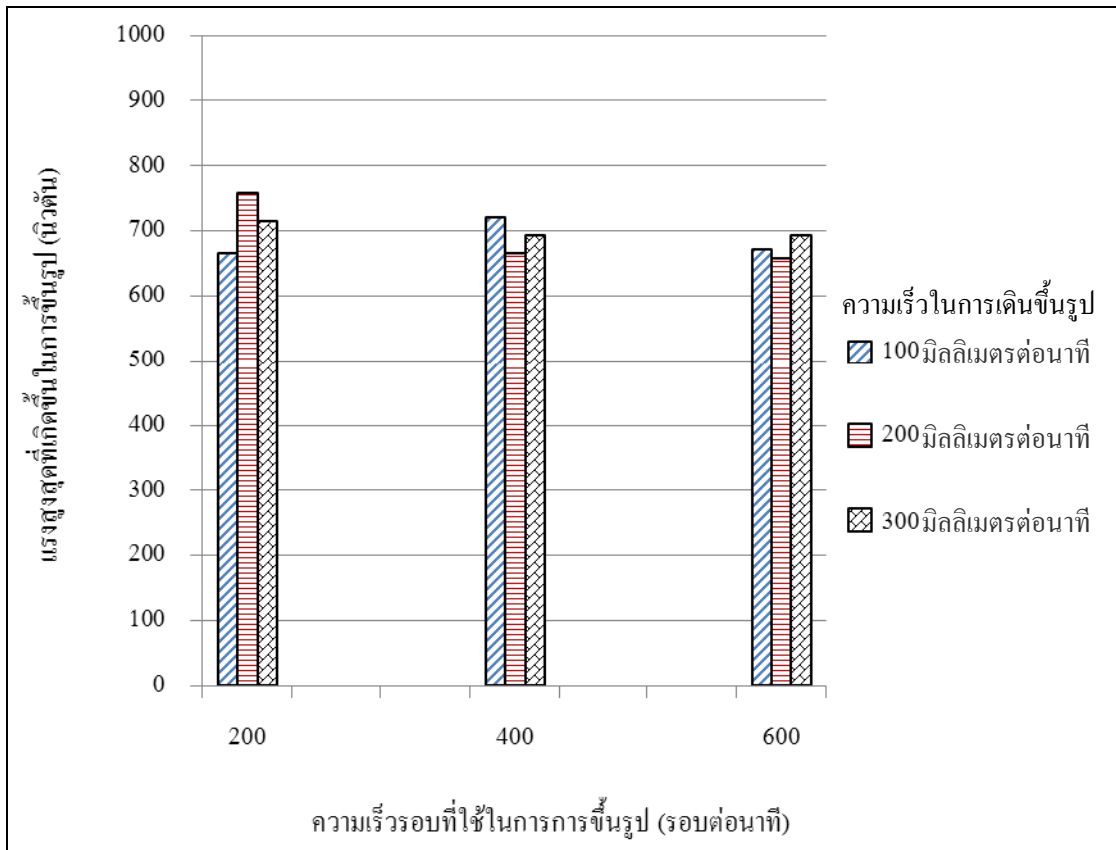
#### 4.1.4 ผลการทดลองแรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูป

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูปโดยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	665.76 นิวตัน	780.30 นิวตัน	671.93 นิวตัน
200 มิลลิเมตรต่อนาที	758.63 นิวตัน	665.74 นิวตัน	656.96 นิวตัน
300 มิลลิเมตรต่อนาที	715.27 นิวตัน	693.20 นิวตัน	693.60 นิวตัน

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.5 (ภาคผนวก ก)

จากผลการทดลองพบว่าแรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศาด้วยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed) และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกัน พบว่า แรงที่เกิดขึ้นต่ำสุดในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา เกิดจาก การขึ้นรูปที่ใช้ตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที คือ 656.96 นิวตัน และพบว่า แรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เกิดขึ้น เกิดจาก การขึ้นรูปที่ใช้ตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 758.63 นิวตัน ดังรูปที่ 4.8



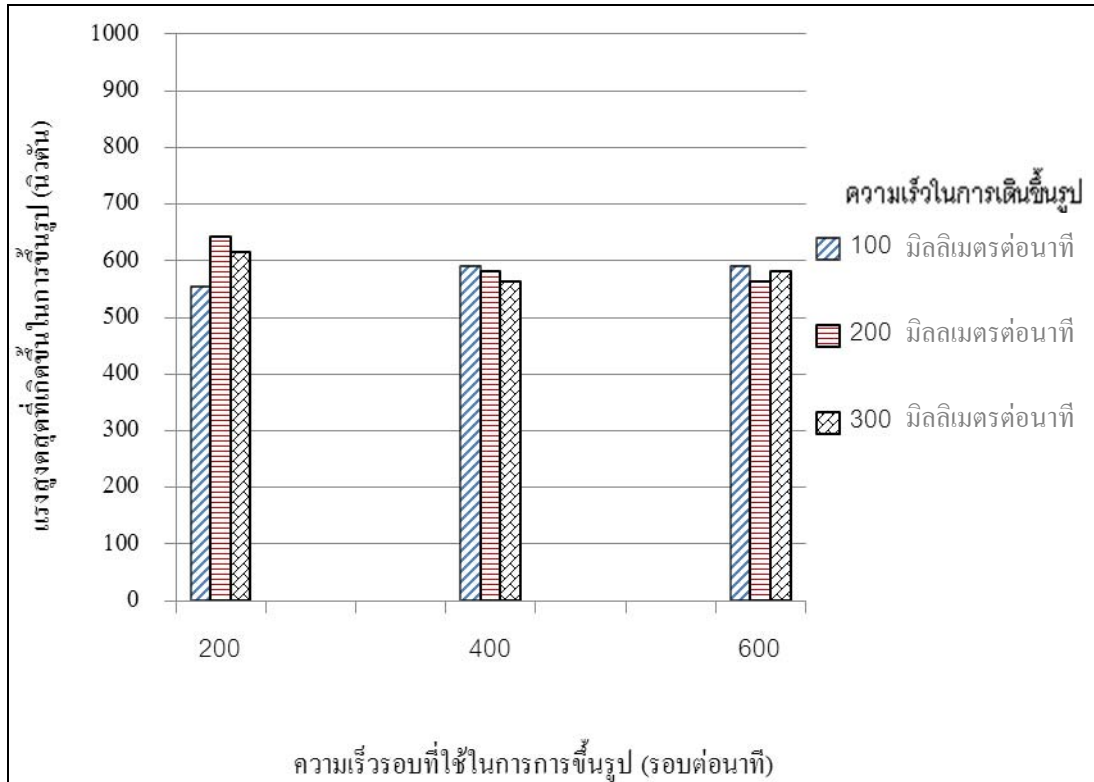
รูปที่ 4.9 แรงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูปโดยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	554.62 นิวตัน	589.83 นิวตัน	589.83 นิวตัน
200 มิลลิเมตรต่อนาที	642.65 นิวตัน	581.03 นิวตัน	563.42 นิวตัน
300 มิลลิเมตรต่อนาที	616.24 นิวตัน	563.42 นิวตัน	581.03 นิวตัน

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.5 (ภาคผนวก ก)

จากผลการทดลองพบว่าแรงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศาด้วยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed) และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกัน พบว่า แรงที่เกิดขึ้นต่ำสุดในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา เกิดจาก การขึ้นรูปที่ใช้ตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที



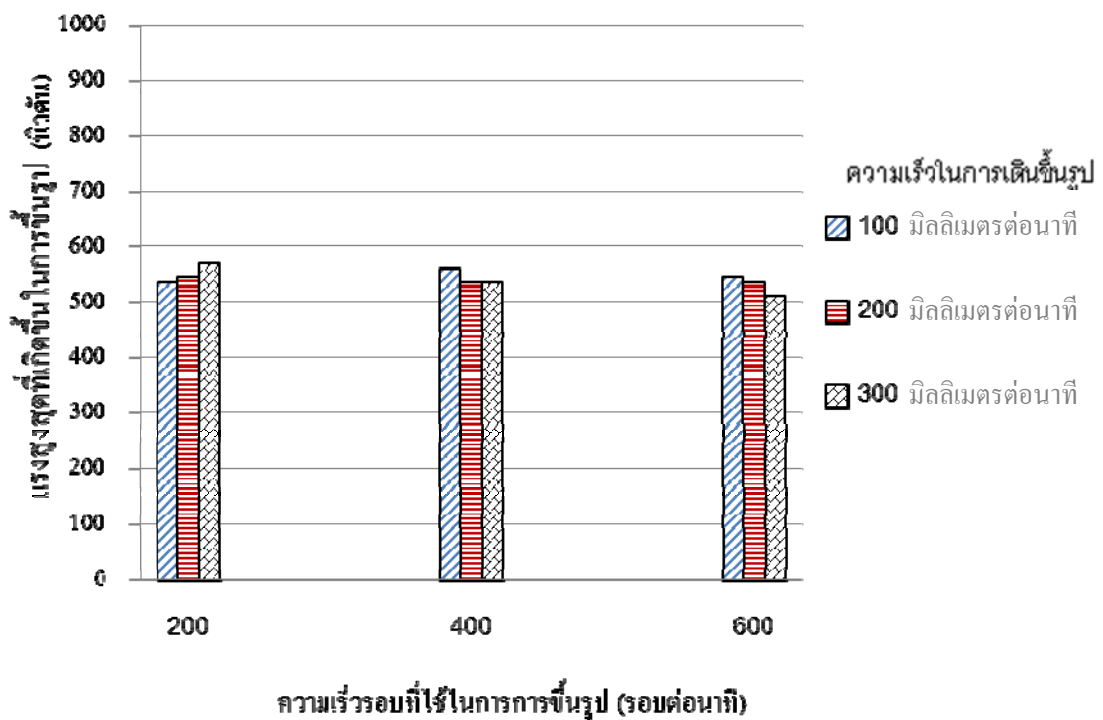
รูปที่ 4.10 แรงที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปโดยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 50 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	537.01 นิวตัน	563.42 นิวตัน	545.81 นิวตัน
200 มิลลิเมตรต่อนาที	545.82 นิวตัน	537.01 นิวตัน	537.01 นิวตัน
300 มิลลิเมตรต่อนาที	572.23 นิวตัน	537.01 นิวตัน	510.60 นิวตัน

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.5 (ภาคผนวก ก)

จากผลการทดลองพบว่าแรงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา ด้วยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed) และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกัน พบว่า แรงที่เกิดขึ้นต่ำสุดในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา เกิดจาก การขึ้นรูปที่ใช้ตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที คือ 510.60 นิวตัน และพบว่า แรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เกิดขึ้น เกิดจาก การขึ้นรูปที่ใช้ตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 572.23 นิวตัน ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 แรงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

#### 4.1.5 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	94.66 %	94.32 %	94.51 %
200 มิลลิเมตรต่อนาที	97.07 %	96.98 %	89.16 %
300 มิลลิเมตรต่อนาที	93.18 %	98.29 %	95.83 %

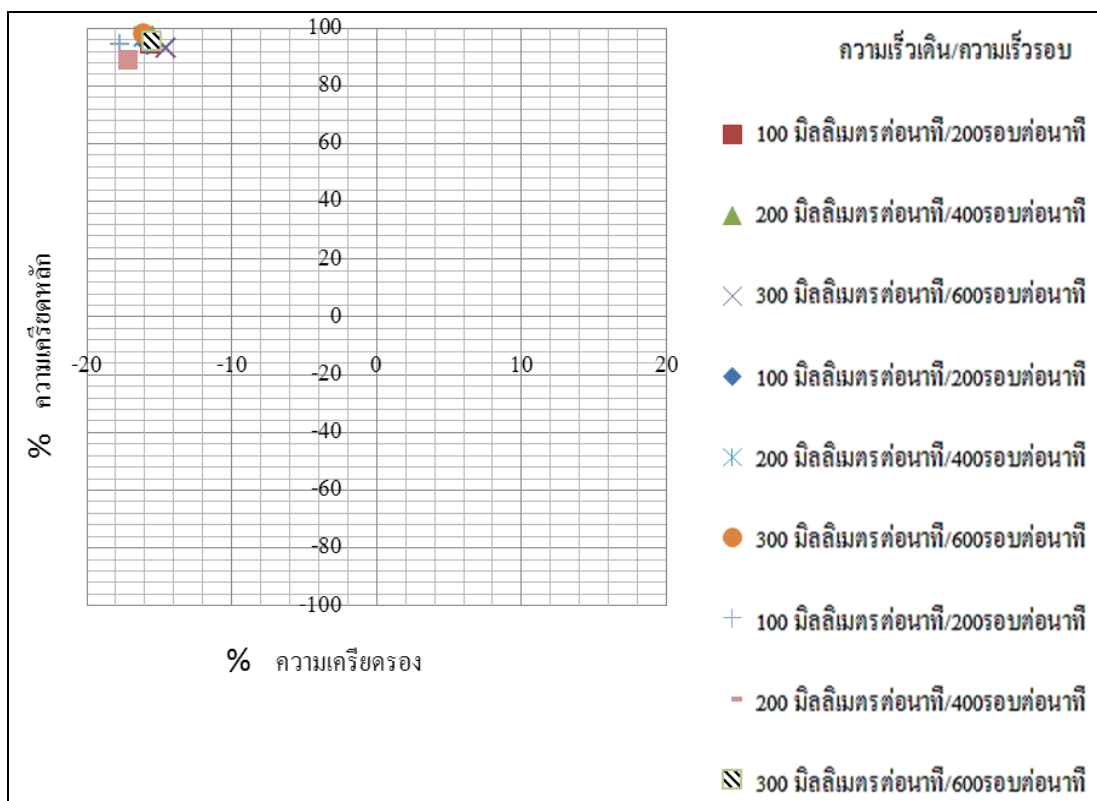
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.1 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

โดยในการขึ้นรูปที่ มุม 30 องศา ลักษณะของวงกลมกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูป จะมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.2 คือ วงกลมกริดที่ถูกขึ้นรูปในแนวแกน จะมีลักษณะ ยี้ออกไปอย่างมาก ทำให้เราสามารถคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้น ที่จากความยาวที่เปลี่ยนไปในแนวแกน เมื่อเทียบกับกับ ยาวเดิม



รูปที่ 4.12 รูปลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดวงกลมที่การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

จากผลการทดลองพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากระบบขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดในตารางที่ 4.4 คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed)และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed)ที่แตกต่างกัน พบว่า อัตราความเครียดหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้น เกิดจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที คือ 89.16 % และพบว่า อัตราความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปรความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อ นาทีและความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาทีคือ 98.29 %



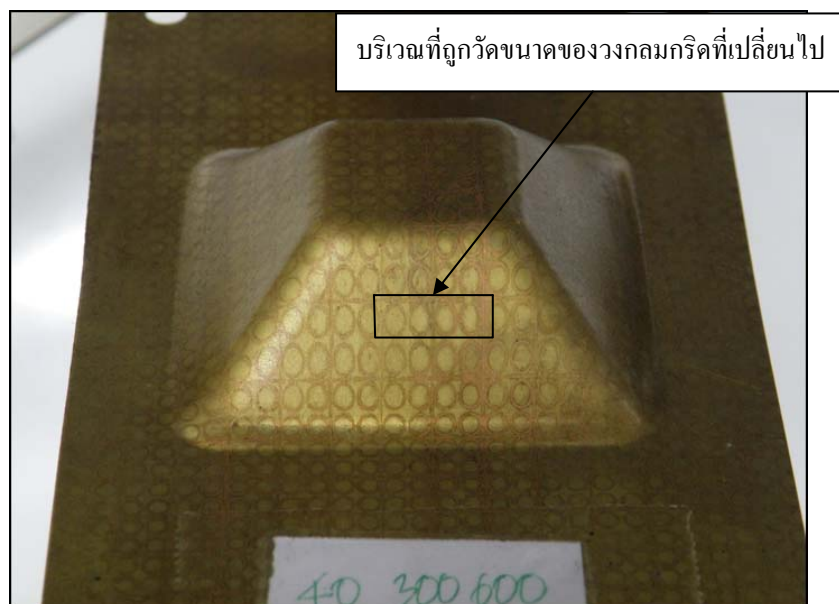
รูปที่ 4.13 อัตราความเครียด ในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	41.55 %	42.80 %	41.10 %
200 มิลลิเมตรต่อนาที	42.51 %	42.78 %	42.58 %
300 มิลลิเมตรต่อนาที	42.73 %	41.94 %	44.32 %

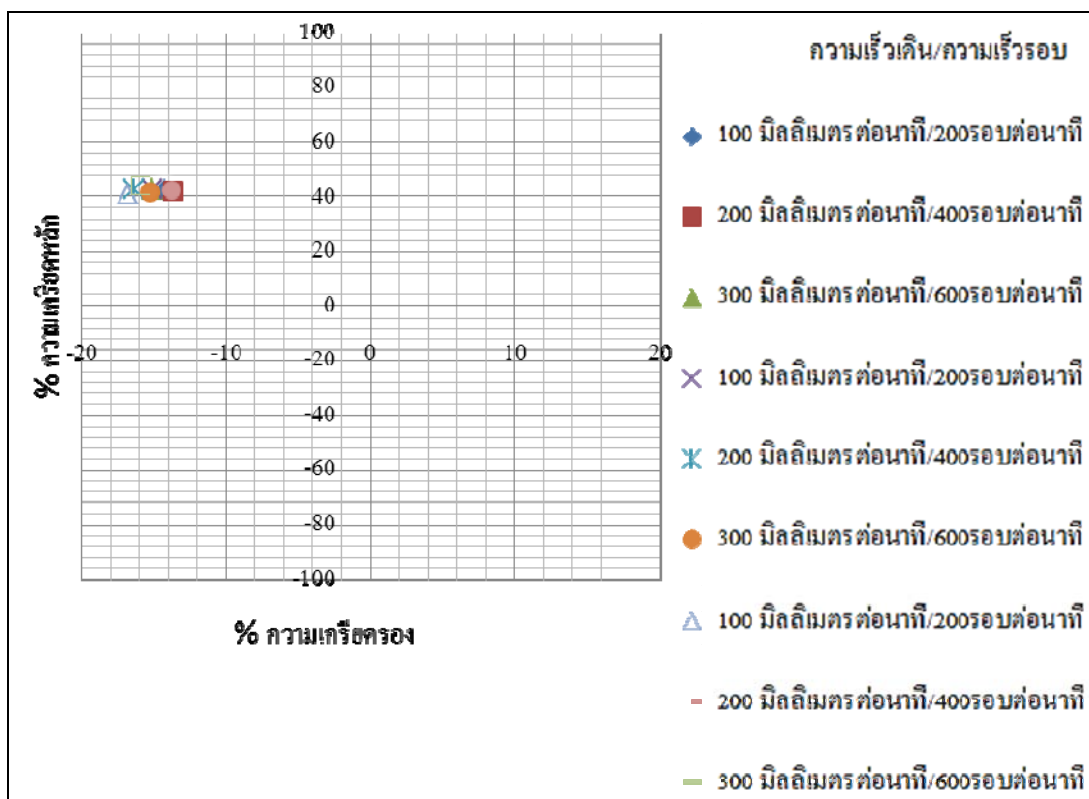
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.2 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

โดยในการขึ้นรูปที่ มุม 40 องศา ลักษณะของวงกลมกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูป จะมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.2 คือ วงกลมกริดที่ถูกขึ้นรูปในแนวแกน Y หรือการ จะมีลักษณะ ยีตออกไปตามแนวแกนเช่นกันแต่ไม่มากเท่ากับการเปลี่ยนรูปร่างตามแกน ของการขึ้นรูปที่มุม 30



รูปที่ 4.14 รูปลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดวงกลมที่การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

จากผลการทดลองพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดในตารางที่ 4.4 คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป (Speed) และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกันพบว่า อัตราความเครียดหลัก



รูปที่ 4.15 อัตราความเครียด ในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

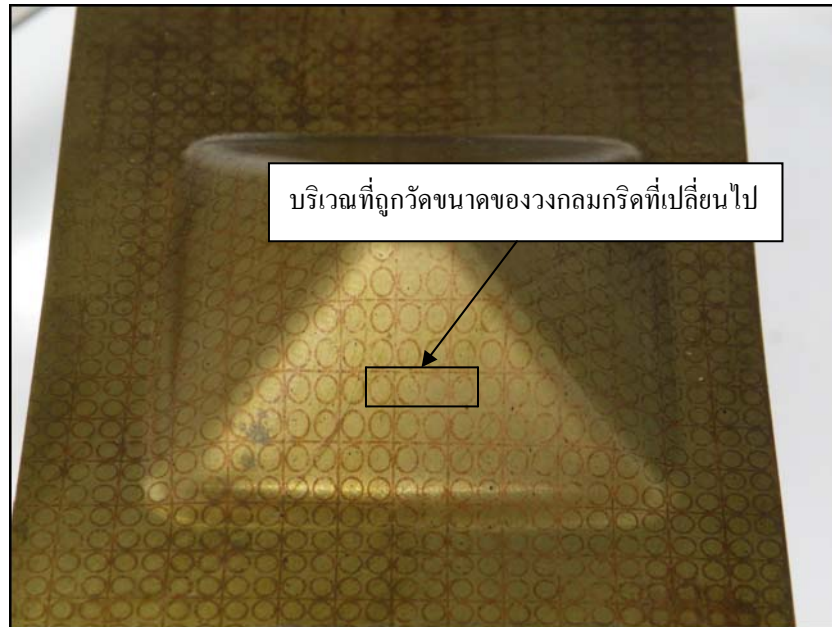
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 50 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	21.42 %	21.18 %	21.08 %
200 มิลลิเมตรต่อนาที	22.14 %	17.96 %	19.48 %
300 มิลลิเมตรต่อนาที	17.40 %	19.60 %	21.64 %

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.3 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

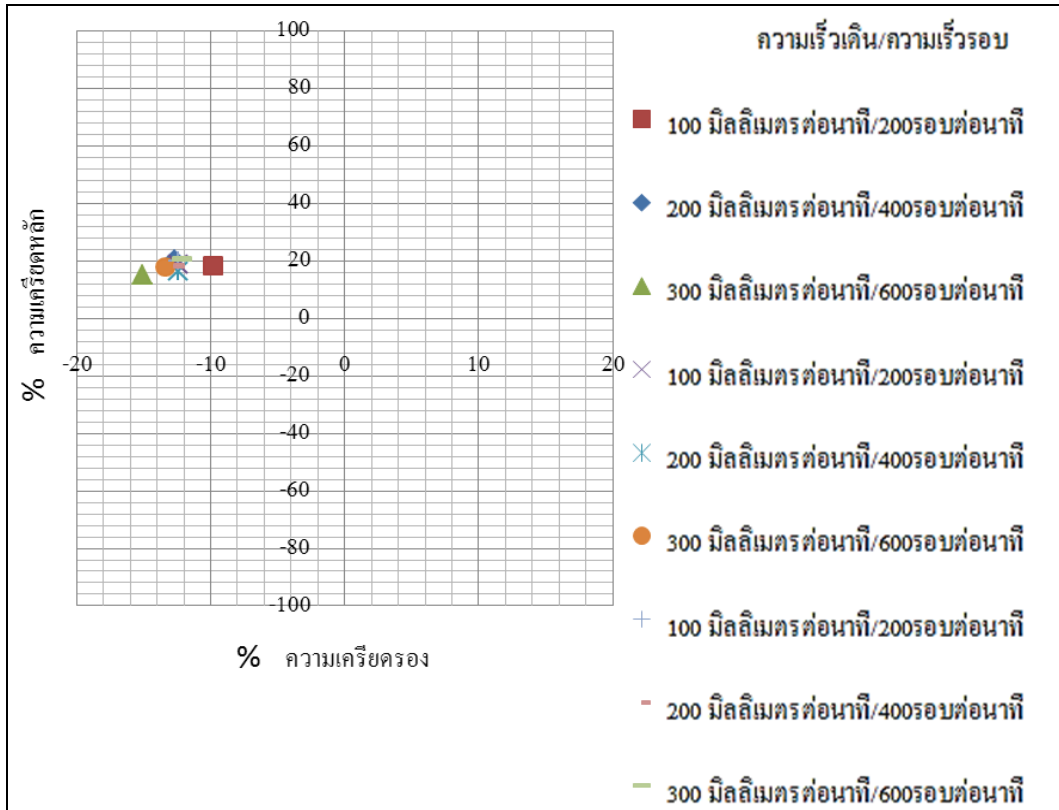


โดยในการขึ้นรูปที่ มุม 50 องศา ลักษณะของวงกลมกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูป จะมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.2 คือ วงกลมกริดที่ถูกขึ้นรูปในแนวแกน Y หรือการ จะมีลักษณะ ยีตออกไปตามแนวแกนเช่นกันแต่มีขนาดของการเปลี่ยนของความกว้างของวงกลมกริด น้อยที่สุดในบรรดามุม ที่ทำการขึ้นรูป



รูปที่ 4.16 รูปลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดวงกลมที่การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

จากผลการทดลองพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดในตารางที่ 4.4 คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed)และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกันพบว่า อัตราความเครียดหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้น เกิดจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 300 รอบต่อนาที คือ 17.40 % และพบว่า อัตราความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการเดินการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อ นาที และความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที คือ 21.64 %



รูปที่ 4.17 อัตราความเครียด ในกระบวนการขึ้นรูปที่ มุม 50 องศา

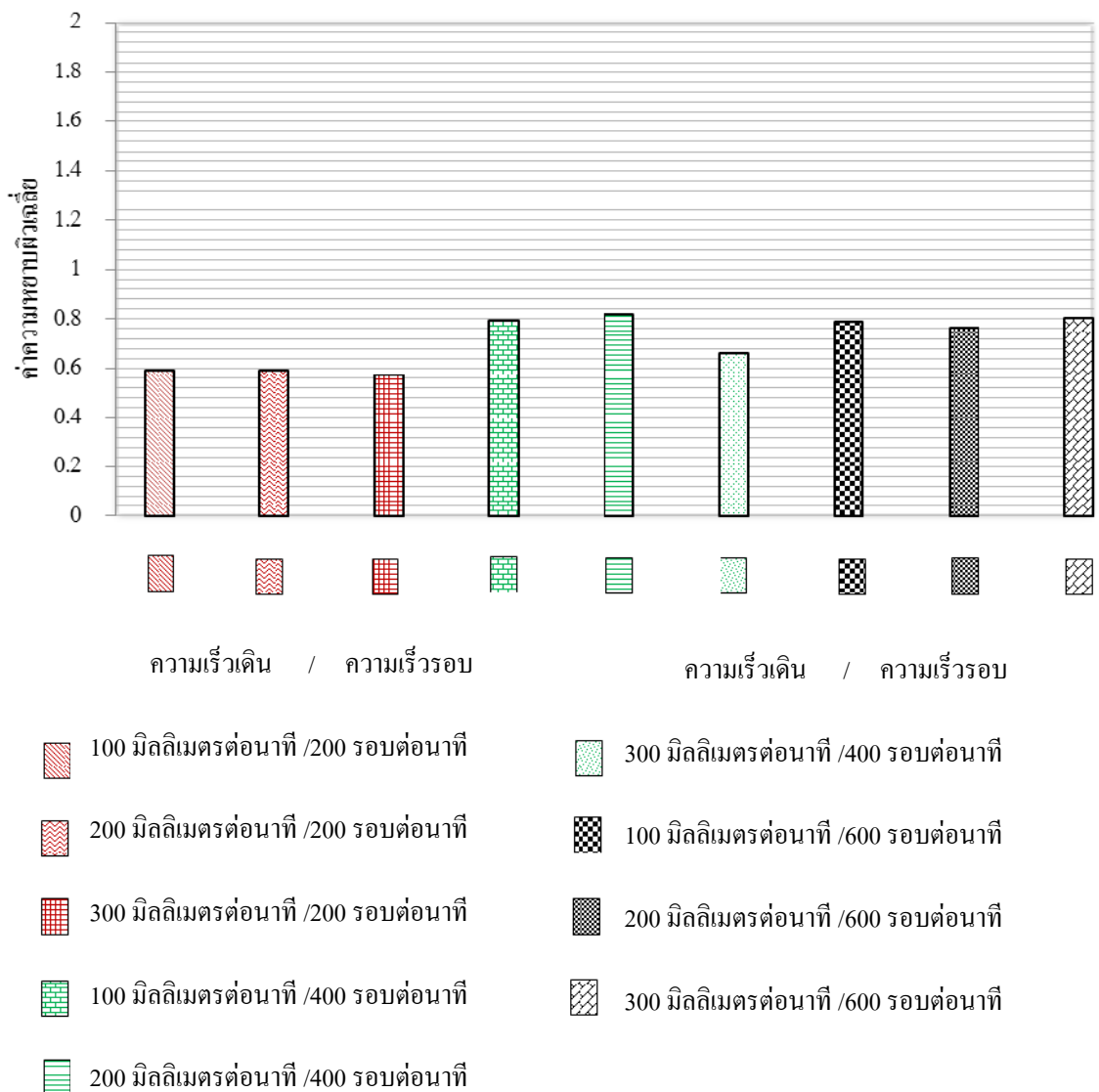
#### 4.1.6 ผลการทดลองในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) โดยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	0.59	0.79	0.79
200 มิลลิเมตรต่อนาที	0.59	0.82	0.77
300 มิลลิเมตรต่อนาที	0.57	0.66	0.80

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.4 (ภาคผนวก ก)

จากการทดลองกระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา แสดงให้เห็นถึงค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยใช้ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตามที่กำหนดใน ตารางที่ 4.4 คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed)และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกันพบว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่ำสุด เกิดขึ้นจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 0.59 Ra และ ความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นสูงสุด เกิดขึ้นจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที คือ 0.82 Ra

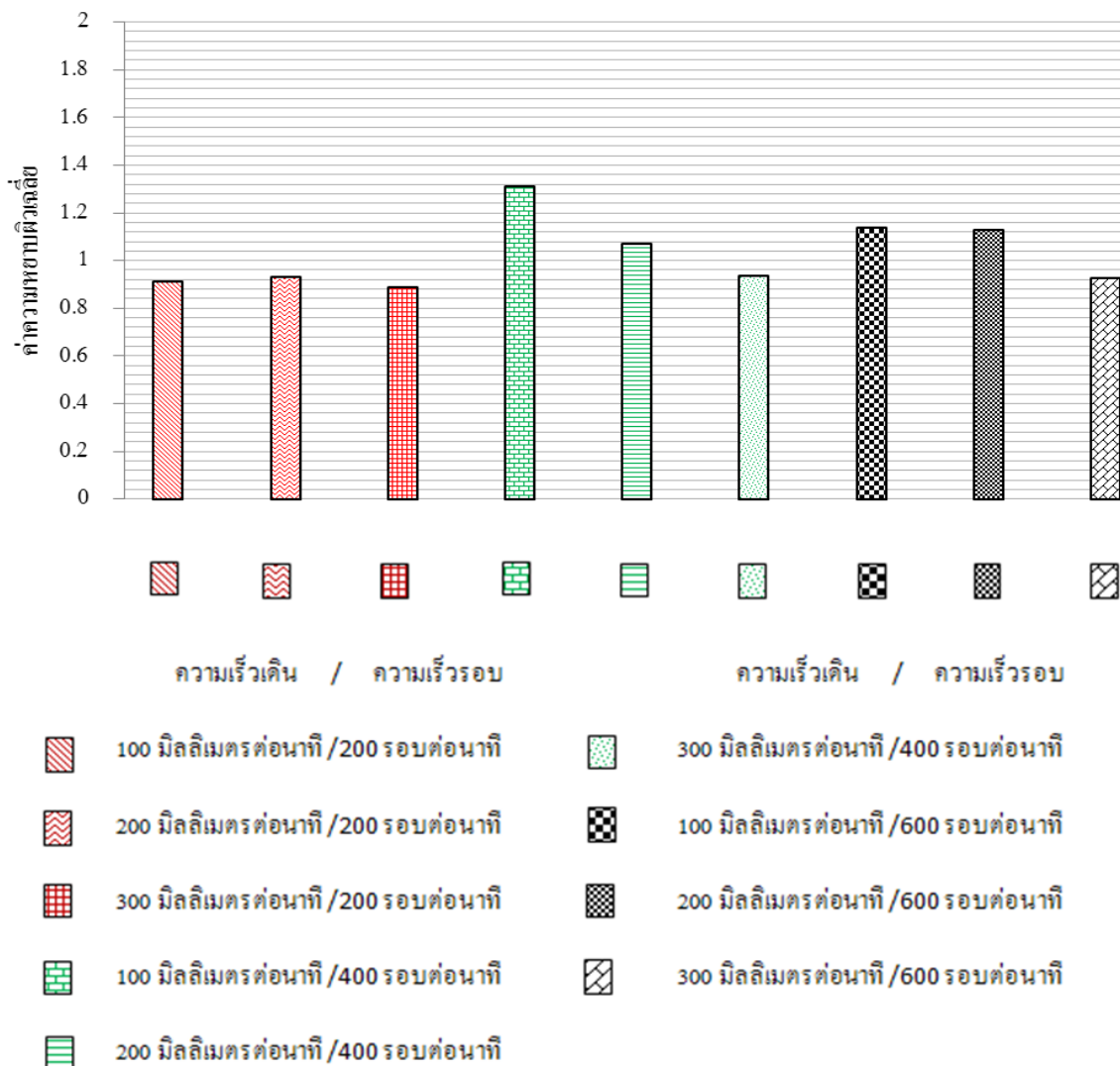


รูปที่ 4.18 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) โดยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	0.91	1.31	1.13
200 มิลลิเมตรต่อนาที	0.93	1.07	1.12
300 มิลลิเมตรต่อนาที	0.89	0.94	0.92

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.4 (ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.19 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

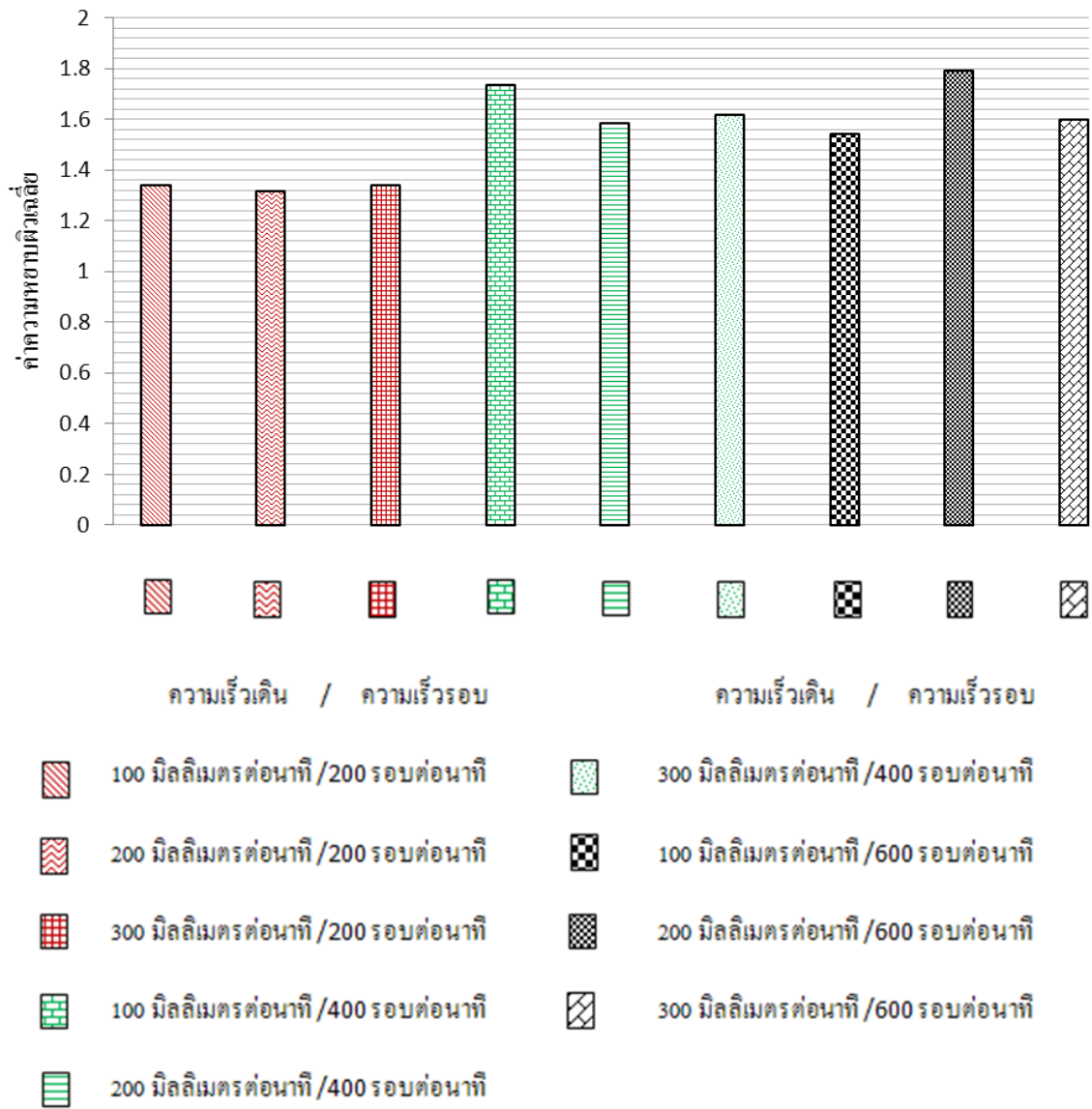
จากการทดลองกระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา แสดงให้เห็นถึงค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยใช้ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตามที่กำหนดใน ตารางที่ 4.4 คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed)และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกันพบว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่ำสุด เกิดขึ้นจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 0.89 Ra และ ความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นสูงสุด เกิดขึ้นจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที คือ 1.31 Ra

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) โดยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 50 องศา		
	ความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที
100 มิลลิเมตรต่อนาที	1.34 Ra	1.74	1.54
200 มิลลิเมตรต่อนาที	1.32	1.59	1.79
300 มิลลิเมตรต่อนาที	1.34	1.62	1.60

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.4 (ภาคผนวก ก)

จากการทดลองกระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา แสดงให้เห็นถึงค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยใช้ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตามที่กำหนดใน ตารางที่ 4.4 คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป (Speed) และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกันพบว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่ำสุด เกิดขึ้นจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 1.32 Ra และ ความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นสูงสุด เกิดขึ้นจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที คือ 1.79 Ra



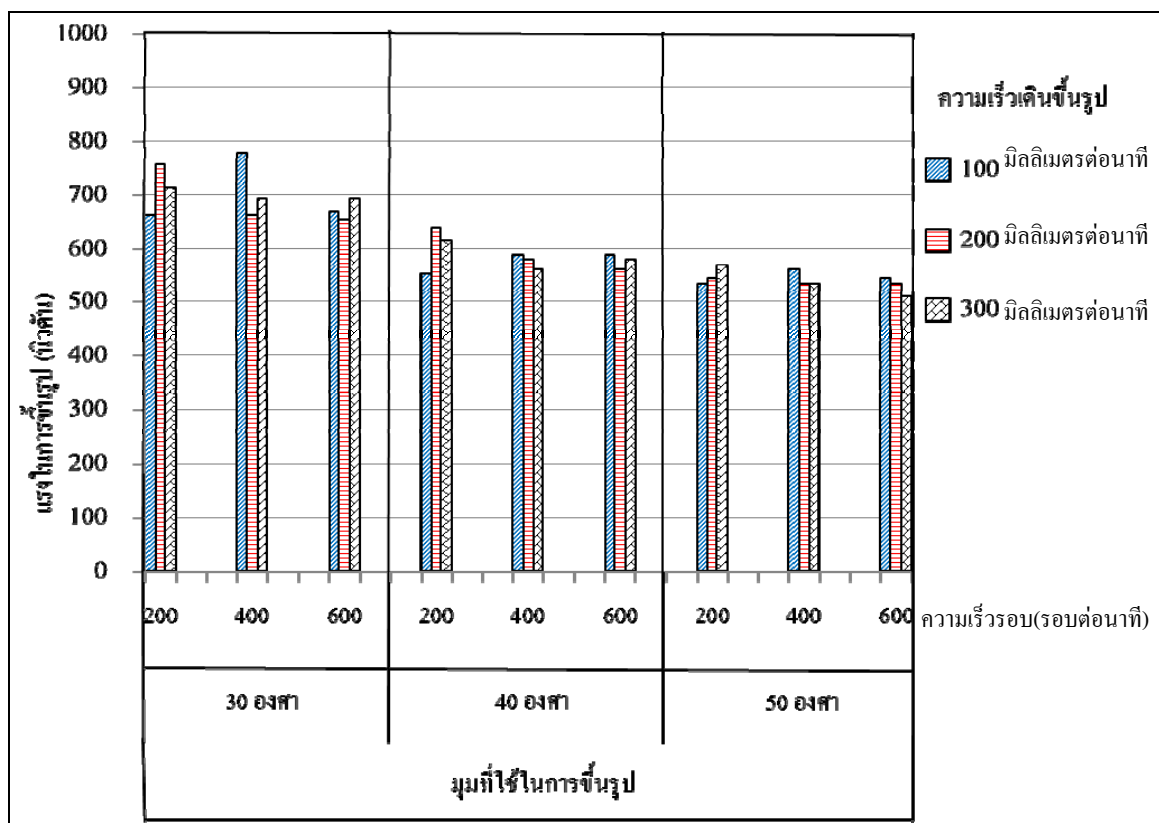
รูปที่ 4.20 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

#### 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการทำงานกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะทำการวิเคราะห์ผลของปัจจัยการทำงานที่มีต่อผลต่อกระบวนการทำงานในรูปของแรงที่เกิดขึ้นจากระบบขึ้นรูป และศึกษาคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยจำแนกตามพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา

#### 4.2.1 วิเคราะห์ผลของปัจจัยในการทำงานที่มีผลแรงที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูป

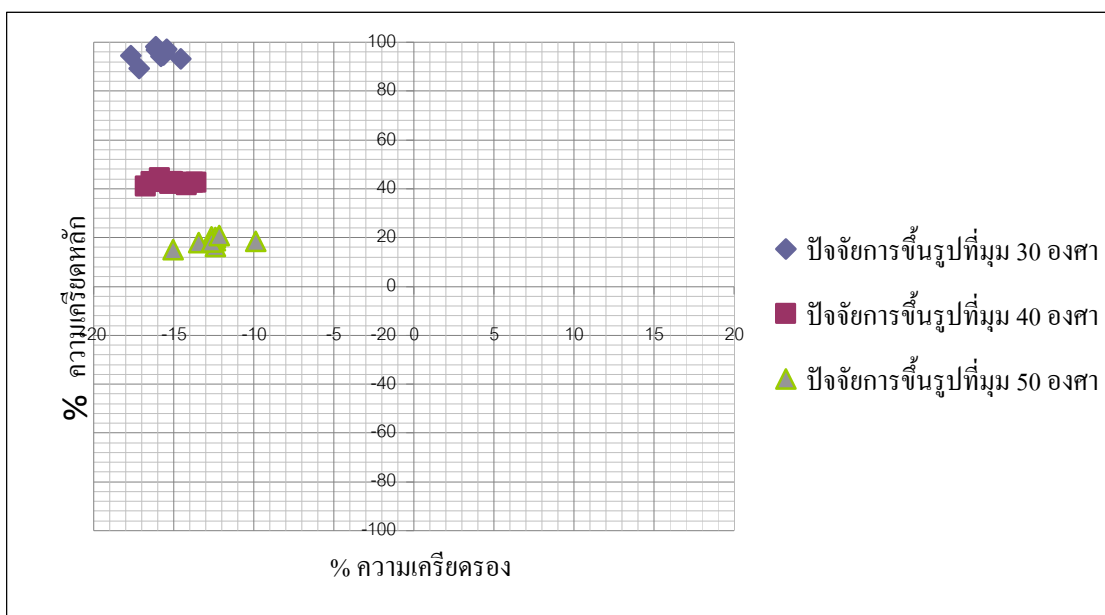
จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดขึ้นใน กระบวนขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนขึ้นรูป กล่าวคือ จากในผลการทดลองในละมูม คือ การขึ้นรูป ที่มูม 30 องศา นั้นจะมีค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 758.63 นิวตัน, การขึ้นรูปที่มูม 40 องศา นั้นจะมี ค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 616.24 นิวตัน และการขึ้นรูปที่มูม 50 องศา นั้นจะมีค่าแรงสูงสุดที่ เกิดขึ้นเท่ากับ 572.23 นิวตัน ทำให้เห็นได้ว่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจาก กระบวนการขึ้นรูปจะลดลง ตาม มูมในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น และในส่วนของผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดขึ้นจาก ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์นั้น ความเร็วรอบ จะเห็นได้จากการทดลองการขึ้นรูปในแต่ละ มูมในการขึ้นรูปซึ่งมีการใช้ปัจจัย ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์และ ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ แตกต่างกันนั้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดขึ้นจากปัจจัยดังกล่าวมีค่าน้อยมาก ดังนั้นปัจจัย มูมที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยก่อให้เกิดแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการน้อยที่สุดในการทำงาน คือการขึ้นรูป ที่มูม 50 องศา



รูปที่ 4.21 ค่าแรงที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป

#### 4.2.2 วิเคราะห์ผลของปัจจัยในการทำงานที่มีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปคือ ปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปและความเร็วในการเดินขึ้นรูป ปัจจัยเนื่องจากการทดลองพบว่า อัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสูงสุดในแต่ละมุม คือการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา ด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที เท่ากับ 98.29 % ,การขึ้นรูปที่มุม 40 องศาด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที เท่ากับ 44.32 % และการขึ้นรูปที่มุม 50 องศาด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที เท่ากับ 21.64 % นั้น จากผลการทดลองทำเห็นได้ว่า เมื่อมุมที่ทำการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ตามลำดับ อัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน ก็ลดลงอย่างมาก และในส่วนความเร็วในการเดินขึ้นรูป นั้น จากการผลทดลองการขึ้นรูป ในแต่ละมุมและความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันนั้น พบว่าอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสูงสุดจะเกิดขึ้น ที่ความเร็วในการเดินขึ้นรูป 300 มิลลิเมตรต่อนาที ใน ทุกๆ มุมที่ทำการขึ้นรูป ในส่วนของปัจจัย ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่แตกต่างกันนั้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดขึ้นจากปัจจัยดังกล่าวมีค่าน้อยมาก ดังนั้นปัจจัยมุมที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยก่อให้เกิดอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานต่ำสุด คือการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา และความเร็วในการเดินขึ้นรูปของอุปกรณ์ที่ความเร็วต่ำกว่า 300 มิลลิเมตรต่อนาที

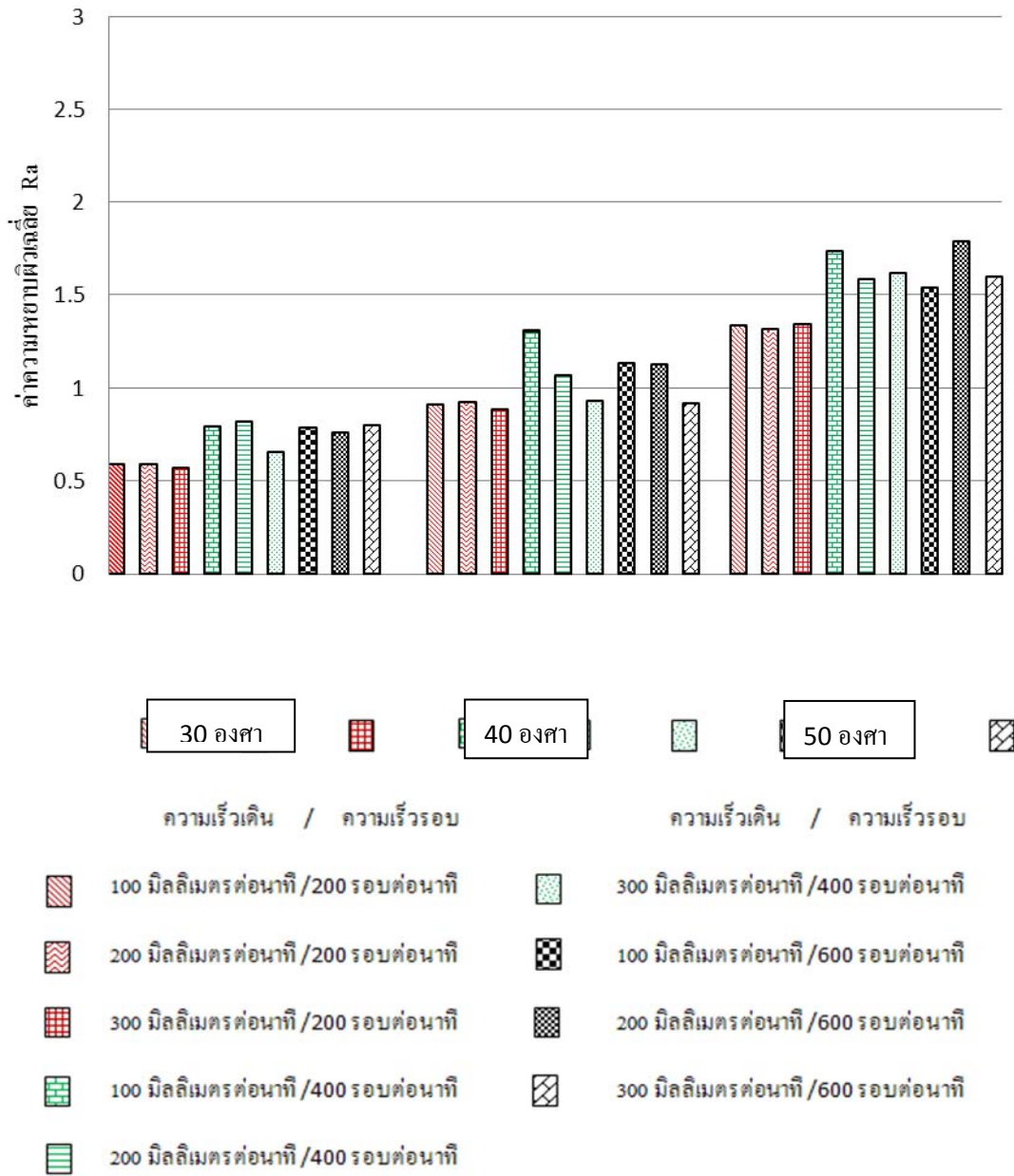


รูปที่ 4.22 อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป



#### 4.2.3 วิเคราะห์ผลของปัจจัยในการทำงานที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยบนพื้นผิวชิ้นงาน หลังการขึ้นรูป

จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปคือ ปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ โดยจากผลการทดลองพบว่า ที่ปัจจัยมุม 30 ปัจจัยการทำงานที่ก่อให้เกิดความหยาบผิวต่ำสุดคือ ตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 0.59 Ra ,ที่ปัจจัยมุม 40 ปัจจัยการทำงานที่ก่อให้เกิดความหยาบผิวต่ำสุด คือตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 0.89 Ra และที่ปัจจัยมุม 50 ปัจจัยการทำงานที่ก่อให้เกิดความหยาบผิวต่ำสุดคือตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 1.32 Ra จากผลการทดลองทำให้เห็นว่า ความหยาบผิวเฉลี่ย นั้น เพิ่มขึ้น เมื่อมุมที่ทำการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น และในส่วนผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวเฉลี่ย จาก ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์นั้นจากการทดลองการขึ้นรูปในแต่ละมุมในการขึ้นรูปซึ่งมีการใช้ปัจจัย และ ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่แตกต่างกันนั้น พบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นจากปัจจัยความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 200 รอบต่อนาที ในแต่ละมุมของการขึ้นรูป แต่ ในส่วนของความเร็วในการเดินขึ้นรูปนั้น มีผลที่จะก่อให้เกิดความหยาบผิวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไป จากปัจจัยการทำงาน น้อยมาก โดยปัจจัยในการขึ้นรูปโดยก่อให้เกิดความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา และ ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ความเร็ว 200 ต่อนาที



แผนภูมิแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยด้วยปัจจัยที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.23 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจากการใช้ปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจะใช้วัสดุโลหะตามมาตรฐาน AISI 1020 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาด ยาว 60 มิลลิเมตร โดยที่ปลายมีรูปร่างครึ่งวงกลม รัศมี 10 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ในการขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด บนวัสดุชิ้นงานแผ่นทองเหลือง โดยใช้จารบีเกรด 306 ในการหล่อลื่นและระบายความร้อน ในขณะที่ทำการขึ้นรูปและทำการการปรับค่าปัจจัยที่ใช้ในการทำงาน ได้แก่ปัจจัยของ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ โดยจะทำการศึกษา แรงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูป และศึกษาคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ทำให้สามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ดังนี้คือ

##### 5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงาน

###### ก. มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปที่มุม 30, 40 และ 50 องศาพบว่าของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป จะลดลงเมื่อมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น โดยค่าของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ที่เกิดขึ้นจะผกผันกับมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป กล่าวคือมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก็จะเพิ่มมากขึ้น โดยมุมที่ก่อให้เกิดแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานสูงสุดคือมุม 30 องศาเท่ากับ 758.63 นิวตันและแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานต่ำสุดที่มุม 50 องศาเท่ากับ 572.23 นิวตัน

###### ข. ความเร็วในการเดินขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูปโดยทำการขึ้นรูปด้วยความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 100, 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ มุมในการขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนที่เท่ากันนั้น พบว่าค่าของแรงที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ทำให้เห็นได้ว่าปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูป ส่งผลต่อการก่อให้เกิดแรงในกระบวนการทำงานน้อย

###### ค. ความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปด้วยปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป ที่ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาทีและใช้ความเร็วในการเดินขึ้นรูป และมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีค่าเท่ากันนั้น พบว่าค่าของแรงที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว จะมีค่าที่ใกล้เคียง

กันเป็นอย่างมาก ทำให้เห็นได้ว่าปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป ส่งผลต่อการก่อให้เกิดแรงในกระบวนการทำงานน้อยมาก

จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยการขึ้นรูปที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดของแรงที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปมากที่สุดคือมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป และมุมที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยมีผลก่อให้เกิดแรงที่เกิดขึ้นในการทำงานน้อยที่สุด คือการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

### 5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงาน

#### ก. มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปที่มุม 30,40 และ 50 องศาพบว่า ค่าความเครียดผิวหลักที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยมุมที่กำหนด แสดงให้เห็นได้ว่าจะมีค่าที่สูงขึ้นตามมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ลดลง โดยค่าของความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูป จะผกผันกับมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป กล่าวคือมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ ความเครียดหลักที่เกิดขึ้น บนพื้นผิวก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยโดยมุมที่ก่อให้เกิดความเครียดหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานสูงสุดคือมุม 30 องศาเท่ากับ 98.29 % และความเครียดหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานต่ำสุดที่มุม 50 องศาเท่ากับ 21.64 %

#### ข. ความเร็วในการเดินขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปด้วยความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 100,200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ มุมในการขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนที่เท่ากันนั้น พบว่าค่าของความเครียดหลักที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว จากการผลทดลองการขึ้นรูป ในแต่ละมุมและความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันนั้น พบว่าอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความเร็วในการเดินขึ้นรูป 300 มิลลิเมตรต่อนาที จะมีค่าสูงสุด มากกว่าค่าอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 100,200 มิลลิเมตรต่อนาที ใน ทุกๆมุมที่ทำการขึ้นรูป

#### ค. ความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปด้วยปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป ที่ 200,400และ 600 รอบต่อนาทีและใช้ความเร็วในการเดินขึ้นรูป และมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีค่าเท่ากันนั้น พบว่าค่าของพหุคูณค่าของความเครียดหลักที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ทำให้เห็นได้ว่าปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป ส่งผลต่อการก่อให้เกิดแรงในกระบวนการทำงานน้อยมาก

จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยมุมที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยก่อให้เกิดอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานต่ำสุด คือการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา และความเร็วในการเดินขึ้นรูปของอุปกรณ์ที่ความเร็ว ที่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตรต่อนาที

### 5.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงาน

#### ก. มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปที่มุม 30, 40 และ 50 องศาพบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยมุมที่กำหนด แสดงให้เห็นได้ว่าจะมีค่าที่สูงขึ้นตามมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น โดยค่าของความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูป จะสัมพันธ์กับมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป กล่าวคือมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้น บนพื้นผิวก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมุมที่ก่อให้เกิดความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานต่ำสุดคือมุม 30 องศาเท่ากับ 0.59 Ra และก่อให้เกิดความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานที่มุม 50 องศา 1.32 Ra

#### ข. ความเร็วในการเดินขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปด้วยความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 100, 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ มุมในการขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนที่เท่ากันนั้น พบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ทำให้เห็นได้ว่าปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูป ส่งผลต่อการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวเฉลี่ยในกระบวนการทำงานน้อย

#### ค. ความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปด้วยปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป ที่ 200, 400 และ 600 รอบต่อนาทีและใช้ความเร็วในการเดินขึ้นรูป และมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีค่าเท่ากันนั้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นจากปัจจัยความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 200 รอบต่อนาที ทำให้เห็นได้ว่าปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป ส่งผลต่อการก่อให้เกิดความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการทำงาน

จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะต่ำสุด คือการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา และปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูปที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะต่ำสุด คือความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ความเร็ว 200 ต่อนาที

### 5.1.4 ปัจจัยความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30, 40 และ 50 องศา

จากผลการทดลองโดยทำการตัดชิ้นงานผ่าครึ่งในแนวแกน แล้วทำการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในจุดต่างๆ พบว่า ตำแหน่งที่มีขีดออกมากที่สุดในการขึ้นรูปนั้นได้แก่ตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นบริเวณใกล้ขอบมุมด้านล่าง และตำแหน่งที่ 5 ที่ขอบมุมด้านล่าง โดยในการขึ้นรูปโดย ที่มุม 30 องศาในตำแหน่งที่ 4 มีความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.22 มิลลิเมตรและในตำแหน่งที่ 5 ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตร, ที่มุม 40 องศาในตำแหน่งที่ 4 มีความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.32

มิลลิเมตรและในตำแหน่งที่ 5 ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.54 มิลลิเมตรและ ที่มุม 50 องศาในตำแหน่งที่ 4 มีความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.42 มิลลิเมตรและในตำแหน่งที่ 5 ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.56 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า ความหนาที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับความหนาเดิม คือ 0.6 มิลลิเมตรนั้น อัตราการยึดตัว ที่การขึ้นรูปที่มุม 30 องศาซึ่งมีค่าความหนาของชิ้นงานต่ำ คือ 0.22 มิลลิเมตร จากการคำนวณ จะมีค่าอัตราการยึดตัว 63.33 % ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมาก คือ จากปกติ 31.6 เปอร์เซ็นต์ % ซึ่งบ่งบอกได้ว่า กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดนั้น สามารถเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองได้อย่างดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดด้วยเครื่องจักร CNC นั้น ควรเลือกใช้เครื่องจักรที่ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนต่างๆมีความเที่ยงตรงในการทำงานสูงและมีการบำรุงรักษา ที่ดีเพราะอาจทำค่าต่างๆที่วัดได้ในการขึ้นรูปมีค่าไม่คงที่

โลหะแผ่นเหล็กชนิดเดียวกันแต่อาจจะมีการผลิตคนละช่วงการผลิตโดยใช้คุณภาพของวัตถุดิบและมาตรฐานการผลิตเหมือนกันหรือคนละบริษัทอาจทำให้สารฝังใน (Inclusion) สมบัติเคมีและสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ทำให้ค่าคุณสมบัติทางกล ที่เกิดขึ้นจากการทำงาน เช่นแรงเกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูป, ความเครียดที่เกิดบนพื้นผิวโลหะ และความหยาบผิวเฉลี่ย ที่ถูกวัดอาจแตกต่างกันบ้าง

### 5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

ก. ทำการศึกษาถึงการปรับปรุงโครงสร้างของโลหะแผ่นเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

ข. ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของการชนิดสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนไปในการทำงานในการทำงานของกระบวนการ

ค. ทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงผลกระทบของการใช้ขนาดของอุปกรณ์ขึ้นรูปที่เปลี่ยนแปลงไปในการขึ้นรูป

4. ทำการศึกษาถึงอิทธิพลในการทำงานในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยโลหะแผ่นชนิดอื่นๆ

## 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] Schmoeckel, D. Development in Automation Flexibilization and Control of Forming Machinery Annals of CIRP vol 40/2/1992:615
- [4] J. Jeswiet, rapid proto-typing with incremental single point forming , CAD/CAM Comput. Graphics 15 (2000) 177-183
- [5] João Luís Padrão de Brito Câmara, Single Point Incremental Forming, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica , Instituto Superior Técnico , 2009
- [6] กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์, การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นส่วนหม้อกรองอากาศรถยนต์
- [7] กมสันต์ งามขำ ศึกษาการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา (2008 )
- [8] JIS B 0031 and JIS B 0061
- [9] 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
- [10] Kathryn Jackson , Julian Allwood , The mechanic of incremental sheet forming , Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) II58-II74
- [11] F.Micari , G.Ambrogio , L.Filice , Shape and Dimension accuracy in Single Point Incremental Forming: State of art and Future trends, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 390-395
- [12] 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
- [13] J.Kopac , Z.Kampus , Incremental sheet metal forming on CNC machine-tool , Journal of Materials Processing Technology 162-163(2005) 622-628

- [14] 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.
- [15] 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



ภาคผนวก ก  
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองการวัดค่าอัตราความเครียดผิว โดยทำการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา  
อัตราความเครียดหลัก (%)

การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา					
ปัจจัยในการทำงาน	อัตราความเครียดหลัก %				
ความเร็วเดิน/ความเร็วรอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่าเฉลี่ย
100/200	95.04	93.96	93.96	95.68	94.66
200/200	99.28	108.04	80.52	100.44	97.07
300/200	87.52	93.96	89.64	101.6	93.18
100/400	84.32	105.76	92.12	95.08	94.32
200/400	105	94	95	93.92	96.98
300/400	98.28	95.12	97.2	102.56	98.29
100/600	94.08	91.8	99.28	92.88	94.51
200/600	81.08	84.32	87.68	103.56	89.16
300/600	96.12	92.88	88.6	105.72	95.83

อัตราความเครียดรอง (%)

การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา					
ปัจจัยในการทำงาน	อัตราความเครียดรอง				
ความเร็วเดิน/ความเร็วรอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่าเฉลี่ย
100/200	-15.64	-17.84	-16.76	-12.28	-15.63
200/200	-12.44	-15.56	-15.36	-18.36	-15.43
300/200	-17.84	-10.28	-14.6	-15.52	-14.56
100/400	-14.6	-11.36	-19.64	-17.52	-15.78
200/400	-15.6	-18.88	-14.28	-15.52	-16.07
300/400	-17.84	-13.48	-16.56	-16.52	-16.1
100/600	-16.76	-15.76	-18.6	-19.64	-17.69
200/600	-17.84	-13.52	-18.6	-18.6	-17.14
300/600	-18.92	-9.16	-15.52	-18.6	-15.55

ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 ,ตารางที่ 3.3และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทดลองการวัดค่าอัตราความเครียดผิว โดยทำการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา อัตราความเครียดหลัก (%)

การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา					
ปัจจัยในการทำงาน	อัตราความเครียดหลัก				
ความเร็วเดิน/ความเร็วรอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่าเฉลี่ย
100/200	42.52	41.88	42.96	38.84	41.55
200/200	40.48	43.56	42.96	43.04	42.51
300/200	41.44	46.8	39.6	43.08	42.73
100/400	43.68	42.6	44	40.92	42.8
200/400	39.44	41.48	44.12	46.08	42.78
300/400	41.08	41.72	43	41.96	41.94
100/600	39.68	42.68	40	42.04	41.1
200/600	40.56	44.88	40.88	44	42.58
300/600	47.88	43.6	40.88	44.92	44.32

อัตราความเครียดรอง (%)

การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา					
ปัจจัยในการทำงาน	อัตราความเครียดรอง				
ความเร็วเดิน/ความเร็วรอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่าเฉลี่ย
100/200	-15.52	-13.96	-12.16	-15.24	-14.22
200/200	-14.48	-12.44	-14.48	-13.04	-13.61
300/200	-15.52	-15.52	-13.2	-16	-15.06
100/400	-15.52	-18.52	-13.2	-13.2	-15.11
200/400	-17.6	-18.6	-15.16	-14.2	-16.39
300/400	-15.28	-19.32	-14.16	-12.16	-15.23
100/600	-18.52	-16.56	-16.08	-15.92	-16.77
200/600	-14.48	-15.28	-10.12	-15.24	-13.78
300/600	-15.52	-17.6	-15.24	-15.24	-15.9

ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 ,ตารางที่ 3.3และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทดลองการวัดค่าอัตราความเครียดผิว โดยทำการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา  
อัตราความเครียดหลัก (%)

การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา					
ปัจจัยในการทำงาน	อัตราความเครียดหลัก				
ความเร็วเดิน/ความเร็วรอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่าเฉลี่ย
100/200	13.84	19.68	16.88	23.16	18.39
200/200	20.4	22.16	16.88	22.12	20.39
300/200	12.72	15.84	12.72	18.96	15.06
100/400	17.92	21.04	14.8	21.32	18.77
200/400	12.76	18.96	16.92	16.96	16.4
300/400	12.72	21.16	20	18.04	17.98
100/600	19.04	19	18.96	23.16	20.04
200/600	18.96	22.08	14.84	16.88	18.19
300/600	20	23.24	20	20.04	20.82

อัตราความเครียดรอง (%)

การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา					
ปัจจัยในการทำงาน	อัตราความเครียดรอง				
ความเร็วเดิน/ความเร็วรอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่าเฉลี่ย
100/200	-8.08	-11.12	-11.12	-9.12	-9.86
200/200	-11.08	-10.12	-14.2	-15.24	-12.66
300/200	-13.2	-16.2	-15.24	-15.6	-15.06
100/400	-13.2	-11.16	-13.2	-12	-12.39
200/400	-14.2	-11.16	-11.12	-13.16	-12.41
300/400	-11.16	-11.16	-16.24	-15.16	-13.43
100/600	-10.12	-13.2	-14.2	-12.12	-12.41
200/600	-15.24	-11.16	-11	-13.2	-12.65
300/600	-12.16	-13.2	-12.16	-11.16	-12.17

ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 ,ตารางที่ 3.3และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก .4 ข้อมูลการทดลองความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มูมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา			มูมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา			มูมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา		
	ความเร็วในการหมุน (Speed)			ความเร็วในการหมุน (Speed)			ความเร็วในการหมุน (Speed)		
	200 RPM	400 RPM	600 RPM	200 RPM	400 RPM	600 RPM	200 RPM	400 RPM	600 RPM
100 mm/min	0.592	0.793	0.787	0.911	1.31	1.137	1.338	1.736	1.54
200 mm/min	0.591	0.82	0.766	0.929	1.071	1.128	1.316	1.583	1.791
300 mm/min	0.572	0.661	0.805	0.886	0.935	0.924	1.339	1.616	1.597

78

ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 ,ตารางที่ 3.3และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทดลองการวัดแรง (Newton)

ความเร็วในการเคลื่อนที่	มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา			มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา			มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา		
	ความเร็วในการหมุน (Speed)			ความเร็วในการหมุน (Speed)			ความเร็วในการหมุน (Speed)		
	200 RPM	400 RPM	600 RPM	200 RPM	400 RPM	600 RPM	200 RPM	400 RPM	600 RPM
100 mm/min	665.76	780.305	671.93	554.62	589.835	589.835	537.015	563.425	545.815
200 mm/min	758.63	665.745	656.96	642.655	581.03	563.42	545.82	537.015	537.015
300 mm/min	715.275	693.205	693.6	616.24	563.425	581.03	572.23	537.015	510.605

ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 ,ตารางที่ 3.3และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลผลการวัดความหนาของผนังชิ้นงานที่เปลี่ยนไปหลังการขึ้นรูป ( มิลลิเมตร )

จุดที่	มุมในการขึ้นรูป		
	30 องศา	40 องศา	50 องศา
1	0.60	0.6	0.6
2	0.54	0.55	0.56
3	0.30	0.42	0.44
4	0.22	0.32	0.42
5	0.32	0.54	0.56
6	0.60	0.6	0.6
7	0.34	0.56	0.56
8	0.22	0.34	0.5
9	0.30	0.42	0.46
10	0.54	0.55	0.56
11	0.60	0.6	0.6

ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 ,ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางเคมี



MTEC NO.1858/54

รายงานผลการวิเคราะห์

วันที่รายงาน	:	30 มีนาคม 2554
ตัวอย่างจาก	:	คุณ ชงชัย เพ็งจันทร์ดี 63 หมู่ 7 ต. องครักษ์ อ.องครักษ์ จ. นครนายก 26120 โทรศัพท์: 081 5578001
ทดสอบโดย	:	ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์คิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ หน่วยวิจัยลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
วันที่รับตัวอย่าง	:	24 มีนาคม 2554
วันที่วิเคราะห์	:	24 - 30 มีนาคม 2554
ขอบเขตการวิเคราะห์	:	วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง
ตัวอย่างที่วิเคราะห์	:	ทองเหลือง 1 ตัวอย่าง
การบ่งชี้ตัวอย่าง	:	ชงชัยทองเหลือง
เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	:	X-ray fluorescence spectrometer, Philips PW-2404
เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์	:	Semi-quantitative X-ray fluorescence spectrometry analysis
สภาวะที่ใช้วิเคราะห์	:	Temperature $25 \pm 5$ °C, Relative humidity $60 \pm 10$ % R.H.
การเตรียมตัวอย่าง	:	ใส่ชิ้นงานลงใน Holder แล้วนำไปวิเคราะห์

MTEC NO.1858/54

1/3

**ผลการวิเคราะห์ :**

จากการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างด้วยเทคนิค X-ray fluorescence ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่พบในตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางข้างล่าง

**ตารางที่ 1** แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง

ธาตุ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง (%wt)
	ร้อยละของเหลือ
Mg	0.04
Al	0.02
Si	0.03
P	0.03
S	0.02
Cl	0.07
Ca	0.01
Fe	0.01
Ni	0.02
Cu	61.34
Zn	38.40
<b>รวม</b>	<b>100.00</b>

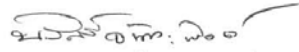
- Notes:**
1. ปริมาณของแต่ละธาตุที่รายงานข้างต้น ได้เทียบจากปริมาณรวมของธาตุที่พบด้วยเทคนิค XRF ทั้งหมดให้เป็น 100%
  2. ปริมาณของธาตุที่เครื่องมือสามารถวัดได้ต่ำสุดคือ 0.01 wt% นอกจากนี้จะแจ้งไว้นอกเหนือจากนั้น
  3. ข้อจำกัดทางเทคนิค XRF คือไม่สามารถวัดส่วนประกอบที่เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่าเลขอะตอมของออกซิเจน (8) และที่มีเลขอะตอมสูงกว่าเลขอะตอมของยูเรเนียม (92)

**ข้อคิดเห็น:** -

**เอกสารแนบ:**

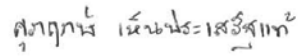
เอกสารแนบที่ 1.1-1.2: กราฟแสดงองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง ร้อยละของเหลือ

ทดสอบโดย:

  
(นายรินทร์ จันทะพิงค์)

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ XRD และ XRF

ตรวจสอบโดย:



(นายสุกฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้)

รักษาการหัวหน้าห้องปฏิบัติการ XRD และ XRF

หมายเหตุ:

1. ศูนย์ฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของรายงาน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร จากศูนย์ฯ
2. ทางศูนย์ฯ ไม่สามารถรับผิดชอบต่อความเสียหายใด ๆ ที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะโดยทางตรงหรือทางอ้อม ในกรณีที่น่าข้อมูล ผลการวิเคราะห์ ข้อเสนอหรือคำแนะนำนำไปใช้ในการออกแบบ การผลิต หรือเพื่อจุดประสงค์ใดก็ตาม
3. ผลการทดลองเป็นจริงเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดลองเท่านั้น



**MATERIAL PROPERTIES ANALYSIS AND DEVELOPMENT CENTRE (MPAD)**

**Request No. :** MDL 0857/54

**Date :** 4 May 2011

**Date of request :** 4 April 2011

**Page :** 1 of 3

**REPORT ON ANALYSIS / TESTING**

**For**

**Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
39 Muh1, Rangsit-Nakhonnayok Rd. Klong Hok, Thanyaburi Pathum Thani 12110**

**Testing/analysis/investigation of :** Brass - Zn 35 % (Transverses and Longitudinal)

**Method of testing/analysis/investigation :** Tensile test according to ASTM E8

**Result of testing/analysis/investigation** :-

The test results are attached.

**Tested/analysed/investigated by**

1. S. Nalithorn  
2. ....

**Approved by**

S. Nalithorn  
(Ms. Nalinthorn Suwaporncharuwach)  
for Director of  
Material Property Development Laboratory

**Examined by**

S. Nalithorn  
(Ms. Nalinthorn Suwaporncharuwach)

**This report contains 3 pages**

FS-MPAD-GEN-510-1-01/02/48

**Remark:** The above results are valid exclusively for tested/analysed samples as mentioned in this report.  
Publication of the results on testing and analysis is prohibited unless written permission is obtained from the Governor of TISTR.



**MATERIAL PROPERTIES ANALYSIS AND DEVELOPMENT CENTRE (MPAD)**

**MATERIAL PROPERTY DEVELOPMENT LABORATORY (MDL)**

Request No. : MDL 0857/54

Date : 4 May 2011

**REPORT**

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Page : 2 of 3

Rajamangala University of Technology Thanyaburi has commissioned the Material Properties Analysis and Development Centre, Thailand Institute of Scientific and Technological Research (MPAD/TISTR) to carry out tensile test of the specimens of Brass - Zn 35 % (Transverses and Longitudinal)

The specimens were prepared by customer. The results are as follows :

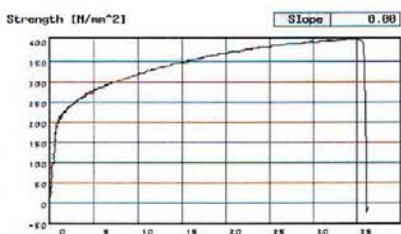
Test date : 4 May 2011

Test temperature : 25 °C

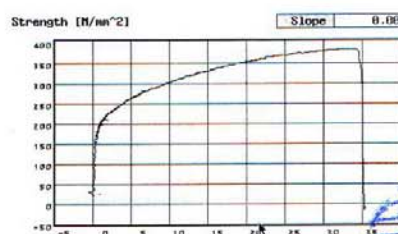
Testing machine : Electromechanical Universal Testing Machine SCHENCK RSA 250

**The results of tensile test of  
Brass - Zn 35 % (Transverses)**

Specimen	T1	T2
Thickness (mm)	0.64	0.66
Width (mm)	12.25	12.35
Cross sectional area (mm <sup>2</sup> )	7.84	8.15
Load at 0.2% offset yield strength (N)	1,572	1,567
Maximum tensile load (kN)	3.139	3.108
0.2% Offset yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	200.51	192.29
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	400.38	381.35
Elongation (%)	29.50	29.66
Location of fracture	In the length	In the length



Tensile no.1



Tensile no.2

FS-MPAD-MDL-510-1-01/02/48





**MATERIAL PROPERTIES ANALYSIS AND DEVELOPMENT CENTRE (MPAD)  
MATERIAL PROPERTY DEVELOPMENT LABORATORY (MDL)**

Request No. : MDL 0857/54

Date : 4 May 2011

**REPORT**

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Page : 3 of 3

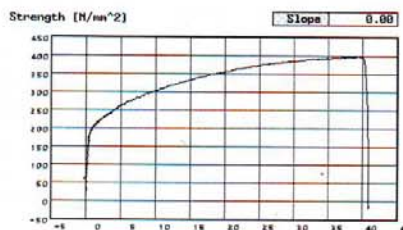
Test date : 4 May 2011

Test temperature : 25 °C

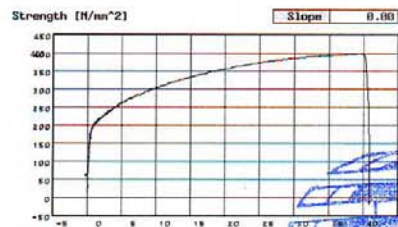
Testing machine : Electromechanical Universal Testing Machine SCHENCK RSA 250

**The results of tensile test of  
Brass - Zn 35 % (Longitudinal)**

Specimen	T1	T2
Thickness (mm)	0.65	0.63
Width (mm)	12.57	12.51
Cross sectional area (mm <sup>2</sup> )	8.17	7.88
Load at 0.2% offset yield strength (N)	1,599	1,569
Maximum tensile load (kN)	3.285	3.274
0.2% Offset yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	195.72	199.15
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	402.08	415.48
Elongation (%)	34.02	31.60
Location of fracture	In the length	In the length



Tensile no.1



Tensile no.2

FS-MPAD-MDL 510-1-01/02/48



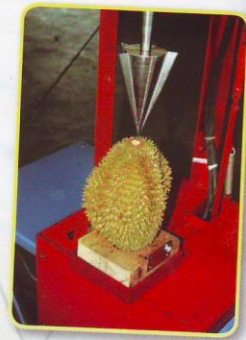
**ภาคผนวก ค**  
**ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่**



# การประชุมวิชาการ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7  
The 7<sup>th</sup> KU-KPS Conference

ก้าวอย่างตามพ่อ สานต่อการศึกษา พัฒนาชาติไทย



พืชและเทคโนโลยีชีวภาพ

สัตว์และสัตว์แพลงก์

จิตกรรมศาสตร์

ส่งเสริมการเกษตร



วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สุขภาพและการกีฬา

นิเทศศาสตร์และพัฒนศาสตร์

มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์



7-8 ธันวาคม 2553

ภาคดัดย่อ  
Abstract



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรินทร์พร สินธุวณิชย์  
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิต ยี่มมงคล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร นาคทอง  
อาจารย์ ดร.วนิดา สืบสายพรหม  
นายสมโภชน์ ทับเจริญ  
อาจารย์ น.สพ.ดร.พิเชษฐ ตูลยกุล  
รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ สิริพลวัฒน์  
สพ.ญ.ดร.จันทรีจิรา ภวภูตานนท์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.วิศณุ บุญญาวิวัฒน์

#### **ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ เศรษฐกุล  
รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ  
รองศาสตราจารย์ ดร.สัณชัย จตุรสิทธิ์ธา  
รองศาสตราจารย์ ดร.เทวินทร์ วงษ์พระลับ  
รองศาสตราจารย์ ดร.รณชัย สิทธิไกรพงษ์  
อาจารย์ ดร.วิฑูรย์ โมพี  
อาจารย์ ดร.อมรรัตน์ โมพี  
นางจินตนา อินทรมงคล  
นายสกันธ์ แสงประดับ  
สพ.ญ.มนยา เอกทัตย์  
สพ.ญ.ดร.สุจีรา ปราชัยานนท์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมแข พิลาสสมบัติ  
อาจารย์ ดร.จตุพร บัณฑิต  
นางสุนีย์ ต๊ะปันตา  
นายกิตติวงศ์ สมบูรณ์ธรรม  
สพ.ญ.ลัดดา ตรงวงศา

#### **ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาวิศวกรรมศาสตร์**

##### **ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

##### **ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร**

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา นิยมมาภา  
รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เขียวอักษร  
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์  
รองศาสตราจารย์วิชา หมั่นทำกา

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนา ตั้งวงศ์กิจ  
รองศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ ชลธนะสวัสดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พจนาน์ สีมันตร

**ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน**

อาจารย์วิษณุวัฒน์ แต่สมบัติ  
รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุธ วุฒินิพนธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ไชยสิทธิ์กุลชัย  
รองศาสตราจารย์ ดร.บัญญัติ ขวัญเย็น

**ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ ชำของ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิรณ

**ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล**

อาจารย์ ดร.ณัฐดนัย ตันวิรุฬห์  
อาจารย์ ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ  
อาจารย์สวัสดิ์ ภูมิสวัสดิ์  
ดร.สุทธิพร เนียมหอม

**ภาควิชาวิศวกรรมโยธา**

รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย กิจวัชรเวทย์  
อาจารย์ ดร.ปนัดดา กลกิจวิวัฒน์  
อาจารย์ ดร.สมชาย ประยงค์พันธ์

**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์**

อาจารย์ ดร.ฐิติพงษ์ สิริเมธีกุล  
อาจารย์ ดร.อมรรฤทธิ์ พุทธิพิพัฒน์ขจร  
อาจารย์ ดร.กายรัฐ เจริญราษฎร์

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

**ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร**

อาจารย์ ดร.รัตนา การุญบุญญานันท์  
อาจารย์ ดร.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงษ์ วาฤทธิ์  
อาจารย์ ดร.พยุงค์ศักดิ์ จุลยุเสนา  
อาจารย์ ดร.บัณฑิต สุขสวัสดิ์

**ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน**

นายวิษณุ ศรีวงษา

#### ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

รองศาสตราจารย์ ดร.อัมพวัน ตันสกุล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพงศ์ วาฤทธิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนัน ปานสาคร  
อาจารย์ ดร.พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์

#### ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทศนพ กำเนิดทอง  
รองศาสตราจารย์สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร  
ดร.ปาชาณ กุลวานิช  
ดร.บัณฑิต ฤทธิประวัติ

#### ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนาชล คงสมบูรณ์  
ดร.กิตติ ทรัพย์ประสม  
ดร.ทวิช พูลเงิน  
อาจารย์ ดร.นที สุรียานนท์

#### สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพดล อุชายภักชาติ  
ดร.วิศรา รอดเหตุภัย  
ดร.รังสรรค์ ชัยศรีเจริญ  
ดร.สุพจน์ เฮงพระพรหม  
ดร.นงลักษณ์ สุวรรณจำรัส

#### ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์

##### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

##### ภาควิชาการพัฒนาศึกษากรรมนุษย์และชุมชน

รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ตันพิชัย  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติ ศรีสวนแดง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สุมิตร สุวรรณ  
อาจารย์ ดร.สุภาภรณ์ สงค์ประชา  
อาจารย์ ดร.วิภาวรรณ ตินนังวัฒนะ  
อาจารย์ ดร.สิริรัตน์ เชษฐสุนทร

##### ภาควิชาครุศึกษา

อาจารย์ ดร.สุริน ชุ่มสาย ณ อยุธยา  
อาจารย์ ดร.พรพิมล ธรรมชาติกรชัย  
อาจารย์ ดร.นันทรัตน์ เครืออินทร์

การศึกษาปัจจัย มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะผสมด้วยกระบวนการขึ้นรูป	
แบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยเครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน .....	129
ตรวจสอบคุณภาพการผลิตเครื่องเล่นดีวีดี ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคความคลุมเครือ .....	131
การศึกษาการเกิดฟาวลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะทางไฮดรอลิกของขำงาน	
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการอุ่นน้ำมันดิบ .....	133
การศึกษาการควบแน่นของน้ำและการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ .....	135
การศึกษาการเกิดฟาวลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของ	
ขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการอุ่นน้ำมันดิบ .....	137
การออกแบบและสร้างเครื่องลงทะเบียนโดยใช้บัตรประจำตัวแบบพกพาสำหรับบันทึก	
การเข้าร่วมกิจกรรมการประกันคุณภาพการศึกษาของมหาวิทยาลัย .....	139
การควบคุมการทรงตัวของจักรยานหุ่นยนต์โดยตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองเหมาะที่สุด .....	141
แบบจำลองสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติสำหรับสายส่งใต้ดิน .....	143
การรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์ไทยโดยใช้รัศมีแวนอนและแนวตั้ง .....	145
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประมาณค่า TOA แบบสองขั้นตอนในระบบ UWB .....	147
การหาพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสกำลังต่ำ โดยใช้สัญญาณกระตุ้นขั้นบันได .....	149
วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งโหมดกระแสที่สร้างจากวงจร CDTAs .....	151
ตัวต้านทานแบบต่อกราวด์ที่ควบคุมด้วยแรงดันที่มีการขยายย่านความเป็นเชิงเส้น .....	153
ระบบรักษาความปลอดภัยภายในบ้านพักอาศัยควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	155
เครื่องส่งแบบใหม่สำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ภายใต้สิ่งแวดล้อมที่มีไทมิงจิตเตอร์ .....	157
การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง	
ในประเทศไทย .....	159
<b>สาขาส่งเสริมการเกษตร</b>	
การผลิตและการตลาดข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในประเทศไทย : กรณีศึกษาจังหวัดสุรินทร์	
จังหวัดเชียงราย และจังหวัดสุพรรณบุรี .....	163
การถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมะละกอแก่เกษตรกรในจังหวัดนครราชสีมา ....	165
การพัฒนาบทเรียนวิชาเกษตร ในระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 ผ่าน e-Learning .....	167
ระบบผู้เชี่ยวชาญในการวินิจฉัยโรคระบบทางเดินอาหารสุกร .....	169
<b>สาขาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม</b>	
ผลของความหนาต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียออกไซด์	
ที่เคลือบด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง .....	173
ผลของการอุณหภูมิอบอ่อนต่อสมบัติไฮโดรฟิลิก ของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์	
ที่เคลือบด้วย วิธี รีแอคทีฟ แมกนีตรอนสปีดเตอริง .....	175

การศึกษาปัจจัย มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะผสมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด  
ด้วยเครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน

A Study of forming angle parameters on single point incremental forming

by CNC 3 axis milling machine of sheet metal

ธงชัย เพ็งจันทร์ดี<sup>1</sup> ศิริชัย ต่อสกุล<sup>1</sup>

Thongchai pangjundee<sup>1</sup> Sirichai Torsakul<sup>1</sup>

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ จะได้นำเสนอกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยใช้หลักการการทำงานที่แตกต่างไปจากการขึ้นรูปโลหะแบบเดิมซึ่งมีต้นทุนและมีการใช้พลังงานในการขึ้นรูปสูงมาก งานวิจัยนี้จะนำเสนอกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ด้วยกระบวนการแบบไม่ใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป นั่นก็คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยใช้เครื่องจักร CNC ในการควบคุมการทำงาน และใช้เครื่องมือในการขึ้นรูปที่ง่ายต่อการผลิต สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดคือ ความหยาบผิวและ รูปทรงที่เปลี่ยนหลังการขึ้นรูปเมื่อเทียบกับแบบงานจริง โดยจะทำการศึกษาการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุ แผ่นโลหะทองเหลือง โดยกำหนดค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการทำงานเช่น ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์ ระยะการกดลึกในแต่ละรอบของการทำงาน และกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป ด้วยมุมที่แตกต่างกันคือมุม 30, 40 และ มุม 50 องศา จากการทดลอง พบว่า ความหยาบผิวของแผ่นโลหะทองเหลืองที่ผ่านการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา จะมีค่าความหยาบผิวสูงสุด ที่ 2.4 Ra และลดลง เมื่อ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยลง และในส่วนของความเที่ยงตรงในการขึ้นรูปนั้น พบว่าที่มุม 50 องศา จะมีค่าความเที่ยงตรงสูงสุด และค่าความเที่ยงตรงจะลดน้อยลง เมื่อมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยลงตามลำดับ

**คำสำคัญ :** กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด, การขึ้นรูปโลหะแผ่น, ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

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

## Abstract

In this research presents the sheet metal forming process that is different from traditional sheet metal forming process which has more cost and more consumed energy. This research also presents the forming process without mold that is single point incremental forming that control by CNC machine and using tools easy to produce. This research studies the factors that affect the single point incremental forming on the sheet metal is the surface roughness and change shape after forming a task compared to the real. The study will shaping the material. Brass plate. By the constant value that used to work as Speed, feed and dept of z axis in each round. And the parameters used in forming. With a different angle is 30, 40 and 50 degree angle. The results showed that the roughness of the brass plate on forming a 50 degree angle. Is the surface roughness of 2.4 Ra and maximum decreases when the angle formed in less. And the accuracy of the geometry found that the angle is 50 degrees with the highest accuracy. And the accuracy is reduced. When the angle formed in the lower order

**Keywords:** single point incremental forming ,sheet metal forming, computer aid manufacturing

**E mail :** thongchai@swu.ac.th

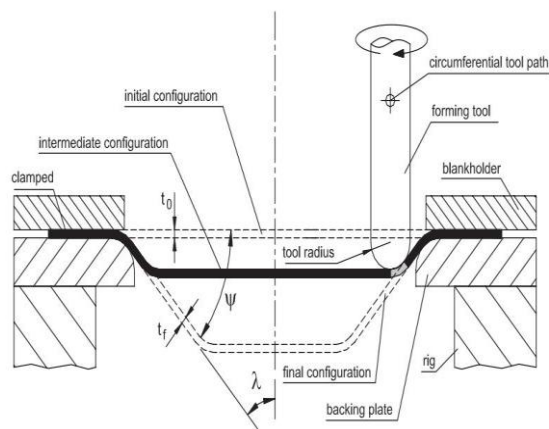
## คำนำ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นในปัจจุบันยังเป็นกระบวนการทำงานที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการทำงาน โดยในการทำงานจะต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบในการทำงานหลายๆส่วนเช่นการผลิตแม่พิมพ์ สำหรับใช้ในการขึ้นรูปซึ่งเป็นอุปกรณ์ขึ้นรูปที่มีความซับซ้อนในการผลิตและมีราคา ค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีความต้องการใช้เครื่องจักรที่ใช้กำลังในการทำงานสูงในการขึ้นรูปอีกด้วย และในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีเดิมนั้น ยังจะต้องการความต้องการในการผลิตที่สูงเพื่อให้คุ้มค่าแก่การสร้างระบบการขึ้นรูปแบบเก่า ซึ่งมีการลงทุนสูงทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลิตภัณฑ์ เป็นไปอย่างล่าช้า ซึ่งขัดแย้งกับความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน ซึ่งต้องการความหลากหลาย ของผลิตภัณฑ์ อย่างสูง ดังที่กล่าวไปแล้ว จึงได้มีการนำเสนอแนวคิดใหม่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยปราศจากการใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป [1] มีการใช้กำลังในการขึ้นรูปน้อยลงและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ที่ไม่มีความซับซ้อนในการผลิตนั่นก็คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด, กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ที่มีความสามารถตอบสนองต่อระบบเศรษฐกิจที่มีความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นได้อย่างรวดเร็ว โดย มีความซับซ้อนในกระบวนการผลิตน้อยกว่ากระบวนการผลิตแบบเดิมมาก [2] ทำให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างรวดเร็ว

## อุปกรณ์และวิธีการในการทดลอง

### รูปแบบการทดลอง

โดยในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยใช้อุปกรณ์ขึ้นรูป รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM)[3] แล้วทำการกดลงบนพื้นผิวแผ่นชิ้นงาน โลหะที่ถูกจับยึด ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรเฉพาะจุดบนแผ่นโลหะดังในรูปที่ 1 โดยในการทดลองนี้ จะมุ่งเน้นตรวจสอบ ถึงผลกระทบของมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป ที่มีผลต่อความหนาผิวและรูปทรงของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับแบบที่กำหนด ในบริเวณที่ถูกทำให้เกิดเสียรูปอย่างถาวร



รูปที่ 1 ลักษณะการทำงานของ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด [4]

### อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. การทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน โดยจะทำการติดตั้งระบบจับยึดแผ่นโลหะ โดยระบบจับยึดแผ่นโลหะจะมีการกำหนด พื้นที่ช่องว่างเพื่อให้แผ่นโลหะเปลี่ยนไปตามรูปแบบที่กำหนด



รูปที่ 2 ลักษณะการติดตั้งระบบจับยึดแผ่นโลหะในการขึ้นรูปด้วย กระบวนการ SPIF

2.อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป จะถูกออกแบบให้ง่ายต่อการขึ้นรูปคือ โดยมีลักษณะคือ ครึ่งทรงกลม ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม โดยใช้วัสดุ เหล็กกล้า สำหรับการผลิตแม่พิมพ์เกรด SKD 11 ถูกขึ้นรูปโดยใช้เครื่องกลึง ที่ถูกควบคุมการทำงานด้วยระบบ CNC ดัง รูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วย กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยการสัมผัสเป็นจุด

3.เครื่องวัดความเรียบผิว จะทำการวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยทำการ วัดค่าเรียบพื้นผิวเฉลี่ย (Ra) ที่เกิดจากการขึ้นรูปตามมุมที่กำหนด โดยในการวัดความเรียบผิว จะเน้นไปที่จุดที่ทูลสัมผัสกับแผ่นโลหะทองเหลือง จนเกิดการขึ้นรูป ทั้งในแนวแกน X และแกน Y

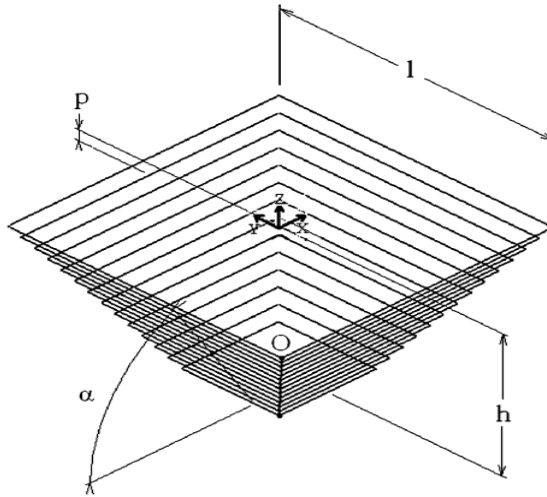
4.เครื่องสแกน พื้นผิวสามมิติแบบสัมผัสโดยทำการสแกนพื้นผิวเพื่อศึกษาถึงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นรูปจากการขึ้นรูป โดยทำการ สแกนพื้นผิวของแผ่นโลหะทองเหลืองที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ความละเอียด 1 ตารางมิลลิเมตร ทั่วทั้งบริเวณที่มีการ เปลี่ยนรูปร่างของแผ่นโลหะ

5.วัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยมุมในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดนั้นจะใช้แผ่นทองเหลือง ขนาด 150 x 90 มม โดยจะมีความหนาของแผ่นทองเหลือง ประมาณ 1 มม

#### วิธีการในการทดลอง

ในการทดสอบนี้ จะใช้การขึ้นรูปทรง ที่ง่ายต่อการขึ้นรูป โดยในการทดสอบจะทำการขึ้นรูปโดยมีรูปทรงแบบ พีรามิดหัวตัด โดยฐานของพีรามิดเป็น สี่เหลี่ยมด้านเท่าขนาด 58 x 58 มม โดยในการขึ้นรูป จะควบคุมเส้นทางในการเดินขึ้นรูปให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ด้วย ระบบ CAM กำหนด ความลึกในการขึ้นรูปไว้ที่ ความลึก 20 มม และมีค่าการ กัดขึ้นรูปในแนวแกน Z เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และมีการใช้สารหล่อลื่นประเภท จารบี ในการลดการเสียดสี โดย มีการกำหนด ตัวแปร คือมุม ที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ มุม 30 องศา , มุม 40 องศา , มุม 50 องศา ดังรูปที่ 4 โดยในการขึ้นรูปนั้นจะมีการใช้ค่าพื้นฐานในการกำหนดการทำงานของเครื่องกัด CNC เท่ากัน ในทุกๆ มุมที่ได้ทำการทดสอบขึ้นรูป ดังรูปที่ 5





รูปที่ 6 ภาพแสดงมุม , เส้นทางการเดิน ของทุกล

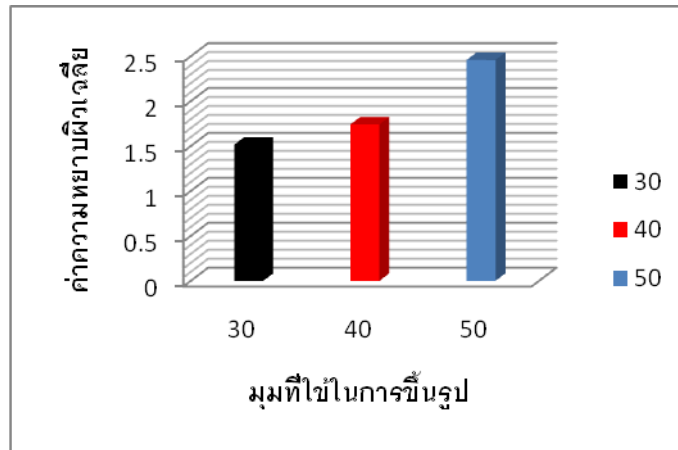
Process parameter	
l (mm)	58 mm
p(mm)	0.5 mm
h(mm)	20 mm
$\alpha$ (°)	30 , 40 , 50
Feed (mm/min)	100
Speed (rpm/min)	200

รูปที่ 7 ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 1.ความหยาบผิวของโลหะ

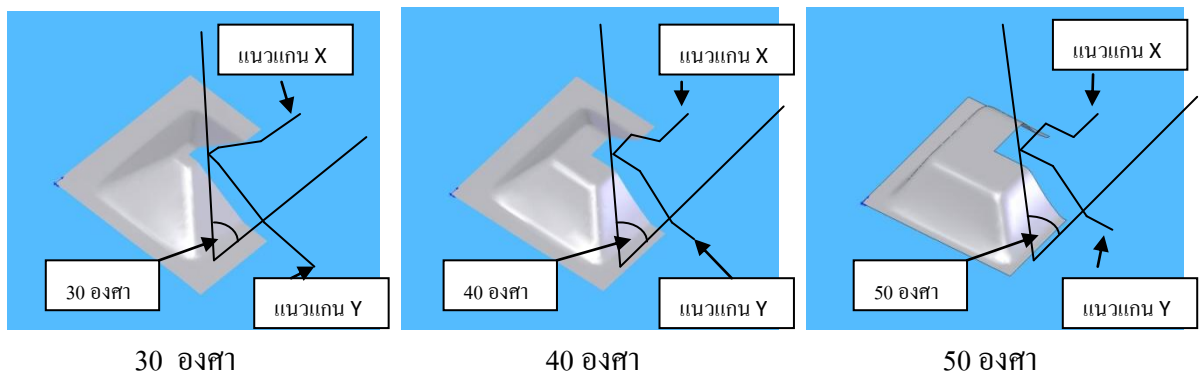
จากการทดลอง ความหยาบผิวของโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่ทำการขึ้นรูป ตามที่ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ความหยาบผิวที่เกิดขึ้นจากระบวนการ ขึ้นรูปแบบ SPIF จะแปรผัน ไปตามมุมที่ได้ทำการขึ้นรูป กล่าวคือ เมื่อมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ค่าความหยาบผิว ที่เกิดจากการขึ้นรูป ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 8 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ต่อมอดที่ใช้การขึ้นรูป

## 2.ความเที่ยงตรงของการขึ้นรูปในแนวแกน x และแกน y

จากการทดลองโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป ด้วยมอดที่กำหนดทั้ง สามมอดคือ 30,40 และ 50 องศา มาทำการสแกนพื้นผิว ด้วยเครื่องสแกนพื้นผิวสามมิติแบบสัมผัส ทำให้ได้รูปทรง ของชิ้นงาน ออกมาเป็นพื้นผิว สามมิติ ดังรูป



รูปที่ 9 รูปชิ้นทดสอบที่ผ่านการสแกนพื้นผิว สาม มิติแล้วจึงทำการเปรียบเทียบรูปทรงสามมิติที่ได้จากการสแกน เทียบ ดันแบบในแนวแกน X และ แนวแกน Y

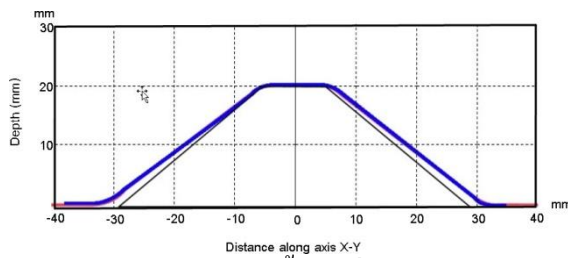
ผลการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงในการขึ้นรูปที่ระหว่างมอด 30,40 และ 50 องศาตามแนวแกน XและตามแนวแกนY

โดยทำการนาระนาบ ภาคตัดในแนวแกน Xและแกน Y ในแต่ละมอดมาเปรียบเทียบกันในแต่ละมอดที่ได้ทำการขึ้นรูป จะพบว่าเมื่อมอดในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นความเที่ยงตรงของชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้น ตามลำดับจะเห็นได้ชัดว่าที่มอด 30 องศา นั้น จะมีค่าความผิดพลาดของ รูปทรง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงที่กำหนดมากที่สุด

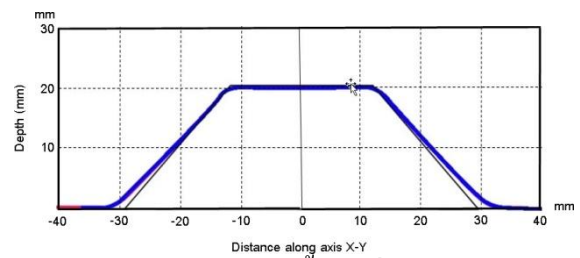
เส้นรูปทรงตามแนวแกน X

เส้นรูปทรงตามแนวแกน Y

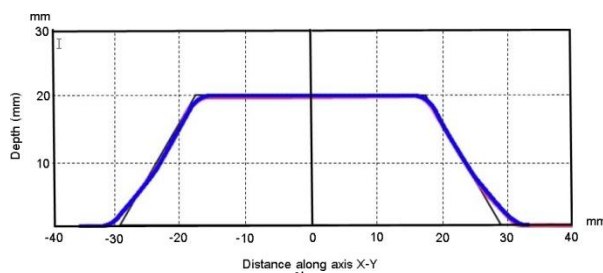
เส้นรูปทรงที่กำหนด



การเปรียบเทียบการขึ้นรูปที่มีมุม 30 องศา



การเปรียบเทียบการขึ้นรูปที่มีมุม 40 องศา



การเปรียบเทียบขึ้นรูปที่มีมุม 50 องศา

รูปที่ 9 รูปแสดงผลการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงในการขึ้นรูปตามแนวแกน X และตามแนวแกน Y

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการขึ้นรูปด้วยกระบวนการการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดโดยกำหนดกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงมุมในการขึ้นรูปเพื่อทำการศึกษาถึงสภาวะของความหยابผิวและความเที่ยงตรงของชิ้นงานทดสอบเมื่อเทียบกับแบบที่กำหนดตามแนวแกน X และ แกน Y จะพบว่า ความหยابผิวของชิ้นงานทดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมที่เพิ่มขึ้นในการขึ้นรูป และ ความเที่ยงตรงของรูปทรงชิ้นงานทดสอบหลังการขึ้นรูปในแนวแกน X และ แกน Y จะ พบว่าความเที่ยงตรงของรูปทรงชิ้นงานหลังการขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ

## 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].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

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายธงชัย เฟื่องจันทร์ดี
วัน เดือน ปีเกิด	25 มิถุนายน 2519
ที่อยู่	81/29 หมู่ 6 ต.ตลาดขวัญ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2543
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2545 – ปัจจุบัน	ตำแหน่งเจ้าหน้าที่ช่างเทคนิค สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

### ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ธงชัย เฟื่องจันทร์ดีและคณะ, “การศึกษาปัจจัย มุมที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นโลหะผสมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดด้วยเครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน,” การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7 2010, 7-8 ธันวาคม 2553, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 2553. หน้า 129 .