

## บทคัดย่อ

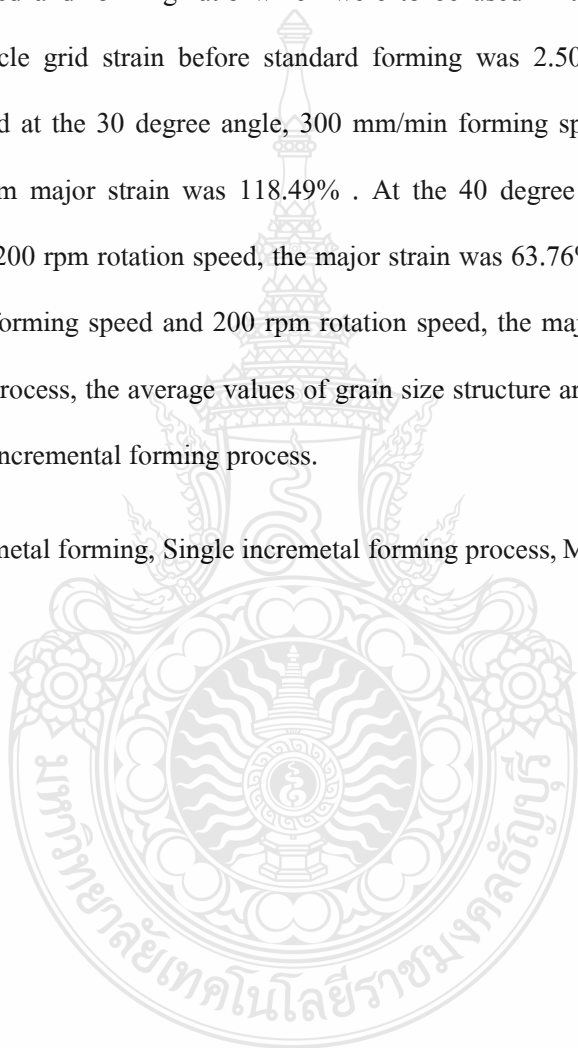
งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะทำการศึกษาการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุ แผ่นโลหะทองเหลือง โดยกำหนดค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ ความเร็วในการหมุนของความเร็วรอบ ความเร็วในการเดินขึ้นรูป และอัตราการเคลื่อนที่ของพันธ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป จากการทดลองความเครียดวงกลมกริดเดิมก่อนขึ้นรูปมาตรฐาน คือ 2.50 มิลลิเมตร หลังการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที จะมีค่าความเครียดหลักสูงสุดที่วัดได้คือ 118.49% ที่มุม 40 องศา ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 300 รอบต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที จะมีค่าความเครียดหลักสูงสุดที่วัดได้คือ 63.76 % ที่มุม 50 องศา ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที จะมีค่าความเครียดหลักสูงสุดที่วัดได้คือ 35.50 % ในปัจจัยการขึ้นรูปทั้งหมด ค่าที่ได้จากการทดลองวัดขนาดโครงสร้างของเกรน จะมีค่าโดยเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก ในทุกจุดที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

**คำหลัก** กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุด  
ค่าความเครียดหลักสูงสุด

## Abstract

This research has been studied through factors in which affecting to the single point incremental forming process by forming brass sheet with determined parameters such as rotation speed, forming speed and forming ratio which were to be used in the forming. Based on the experiment, the circle grid strain before standard forming was 2.50 mm; however when the material was formed at the 30 degree angle, 300 mm/min forming speed and 400 rpm rotation speed, the maximum major strain was 118.49% . At the 40 degree angle, with 300 mm/min forming speed and 200 rpm rotation speed, the major strain was 63.76%. At the 50 degree angle, with 300 mm/min forming speed and 200 rpm rotation speed, the major strain was 35.50%. All factors in forming process, the average values of grain size structure are very similar in all points on the single point incremental forming process.

**Keywords:** Sheet metal forming, Single incremental forming process, Maximum major strain



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาคีชาววิศวกรรมอุตสาหกรรม และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณประจำปี 2556 ในงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ในอุตสาหกรรมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับงานวิจัยฉบับนี้ต่อไป

คณะผู้วิจัย



## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                       | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ  | ค    |
| สารบัญ   | ง    |
| สารบัญตาราง  | ฉ    |
| สารบัญรูป  | ณ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ                                | ฑ    |
| บทที่ 1 บทนำ   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ                               | 1    |
| 1.2 จุดประสงค์ของโครงการ                                 | 3    |
| 1.3 ขอบเขตโครงการ  | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                            | 4    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง/ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5    |
| 2.1 แนวความคิด   | 5    |
| 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง                                   | 6    |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                | 42   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน                                    | 45   |
| 3.1 แผนการดำเนินงาน                                      | 45   |
| 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน                                  | 45   |
| บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน                  | 66   |
| 4.1 ผลการทดสอบ   | 66   |
| 4.2 วิเคราะห์การทดลอง                                    | 90   |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ                                | 96   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง                                       | 96   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ   | 98   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บรรณานุกรม   | 100  |
| ภาคผนวก ก  | 102  |
| ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางเคมี                                 | 103  |
| ภาคผนวก ข  | 109  |
| ภาพรวม โครงสร้างจุลภาคของทองเหลืองก่อนขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า | 110  |
| ภาคผนวก ค  | 111  |
| ภาพรวม โครงสร้างจุลภาคของทองเหลืองหลังขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า | 112  |
| ภาคผนวก ง  | 139  |
| ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า           | 140  |
| ภาคผนวก จ  | 143  |
| ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า           | 144  |
| ภาคผนวก ฉ  | 171  |
| ข้อมูลการทดลอง   | 172  |
| ภาคผนวก ช  | 183  |
| การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ (IE Network Conference 2013)             |      |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1      | คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics) ของเหล็ก JIS SKD 11 หรือเหล็ก DIN 1.2379   | 14   |
| 2.2      | เรซินที่ใช้ในการเทหุ้มยึดชิ้นทดสอบที่สำคัญ   | 35   |
| 2.3      | อัตราส่วนผสมของกรดที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐาน ASTM [10]   | 39   |
| 2.4      | การกำหนดขนาดความโตของเม็ดเกรนตาม ASTM และจำนวนเม็ดเกรนต่อ $\text{mm}^2$  | 41   |
| 3.1      | องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดลอง  | 46   |
| 3.2      | คุณสมบัติทางกลของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดลอง   | 47   |
| 3.3      | ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา  | 51   |
| 3.4      | ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา  | 52   |
| 3.5      | ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา  | 52   |
| 4.1      | ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา  | 69   |
| 4.2      | ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา  | 70   |
| 4.3      | ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา  | 71   |
| 4.4      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไมล้าที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)        | 72   |
| 4.5      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปจุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %) | 73   |
| 4.6      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไมล้าที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)        | 76   |
| 4.7      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปจุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %) | 77   |

## สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ |   | หน้า |
|----------|---|------|
| 4.8      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)        | 80   |
| 4.9      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรม ที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %) | 81   |
| 4.10     | ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนในสภาพจำหน่าย ก่อนการขึ้นรูป  | 83   |
| 4.11     | ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุ่ม 30 องศา  | 85   |
| 4.12     | ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุ่ม 40 องศา  | 86   |
| 4.13     | ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุ่ม 50 องศา  | 88   |
| ฉ.1      | ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุ่ม 30 องศา  | 172  |
| ฉ.2      | ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุ่ม 40 องศา  | 174  |
| ฉ.3      | ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุ่ม 50 องศา  | 173  |
| ฉ.4      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)        | 174  |
| ฉ.5      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุ่ม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)  | 175  |
| ฉ.6      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)        | 176  |
| ฉ.7      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุ่ม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)  | 177  |
| ฉ.8      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)        | 178  |
| ฉ.9      | ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรม ที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %) | 179  |

## สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ |                        | หน้า |
|----------|------------------------|------|
| ฉ.10     | อัตราความเครียดรอง (%) | 180  |
| ฉ.11     | อัตราความเครียดรอง (%) | 181  |
| ฉ.12     | อัตราความเครียดรอง (%) | 182  |





## สารบัญรูป

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 1.1    | กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด                             | 2    |
| 2.1    | ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด             | 6    |
| 2.2    | กระบวนการกดขึ้นรูป   | 7    |
| 2.3    | กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์   | 7    |
| 2.4    | กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั้นขึ้นรูป                                   | 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   | 16   |
| 2.12   | การดึงขึ้นรูป และการดึงขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า $r > 50\%$                        | 17   |
| 2.13   | แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการงอขึ้นรูป  | 18   |
| 2.14   | ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ                                   | 19   |
| 2.15   | ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง  | 20   |
| 2.16   | การไหลของโลหะและการบิดงอ   | 21   |
| 2.17   | การทดสอบการดึง   | 22   |
| 2.18   | แรงดึง (Tensile)   | 23   |
| 2.19   | แรงกด (Compression)  | 24   |
| 2.20   | แรงเฉือน (Shear)   | 24   |
| 2.21   | ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ   | 25   |
| 2.22   | ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)   | 26   |
| 2.23   | ความเครียดเฉือน (Shear Strain)   | 27   |
| 2.24   | เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) | 28   |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.25   | ลักษณะตารางวงกลมกรีดบนโลหะแผ่น  | 29   |
| 2.26   | การวัดอัตรา เปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดรอง โดยค่าที่ได้จากการ คำนวณจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูป | 30   |
| 2.27   | ตัวอย่างแผนภาพแสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป  | 31   |
| 2.28   | การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม  | 31   |
| 2.29   | ขนาดขึ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค   | 34   |
| 2.30   | การเทรซินหุ้มขึ้นทดสอบ  | 34   |
| 2.31   | การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย  | 35   |
| 2.32   | การใส่สารขัดบนผ้าสักหลาด  | 36   |
| 2.33   | หลักการฉายแสงและการมองในกล้องจุลทรรศน์  | 37   |
| 2.34   | แสดงลำแสงที่ฉายในกล้องจุลทรรศน์ตามหลักรูปที่  | 37   |
| 2.35   | การกัดตำแหน่งขอบเม็ดเกรน  | 38   |
| 2.36   | กรดกัดตำแหน่งผิวหน้าเม็ดเกรน  | 38   |
| 2.37   | การหาขนาดความโตเม็ดเกรน   | 40   |
| 2.38   | การหาขนาดความโตเม็ดเกรนตามเบอร์ของ  | 42   |
| 3.1    | ชิ้นงานแผ่นทองเหลือง  | 46   |
| 3.2    | อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่น โลหะ  | 48   |
| 3.3    | อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่น โลหะ  | 48   |
| 3.4    | แผ่นทองเหลืองที่ผ่านการ ตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า   | 49   |
| 3.5    | กระบวนการกรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า   | 50   |
| 3.6    | แสดงมุม , เส้นทางการเดิน และ ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป   | 51   |
| 3.7    | เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน รุ่น ARROW 500  | 53   |
| 3.8    | บริเวณทำการวัดความเครียดชิ้นงานทั้งหมด  | 53   |
| 3.9    | กล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง  | 54   |
| 3.10   | โปรแกรมสำหรับใช้ในการวัดขนาด  | 54   |
| 3.11   | รูปการกำหนดขนาดอ้างอิงของกริดมาตรฐาน  | 55   |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 3.12   | รูปการสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน  | 55   |
| 3.13   | การวัดอัตรา เปอร์เซ็นต์ความเครียดและอัตรา เปอร์เซ็นต์ความเครียดรอง  | 56   |
| 3.14   | แผ่นไมล่า(Myla tape or Strain Tape) วัดความเครียด   | 57   |
| 3.15   | รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา   | 58   |
| 3.16   | รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา   | 58   |
| 3.17   | รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา   | 58   |
| 3.18   | กระบวนการตัดผ้าขึ้นงาน  | 59   |
| 3.19   | รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา  | 59   |
| 3.20   | รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา  | 59   |
| 3.21   | รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา  | 60   |
| 3.22   | กระบวนการเตรียมชิ้นงานหล่อซิลิโคน   | 60   |
| 3.23   | กระบวนการเตรียมชิ้นงานหล่อเรซิน   | 61   |
| 3.24   | เครื่องขัดที่ใช้ในการขัดผิว   | 61   |
| 3.25   | รูปกรด $H_2O + HCL + FeCl_2$  | 62   |
| 3.26   | กล้อง Microscope ZEISS รุ่น AXIOVERT 200M MAT   | 62   |
| 3.27   | ภาพโปรแกรมที่ใช้วัดขนาดเกรน   | 63   |
| 3.28   | รูปการเลือกใช้โปรแกรมวัดขนาด  | 63   |
| 3.29   | รูปการเลือกภาพถ่ายเพื่อวัดขนาด  | 64   |
| 3.30   | รูปการเลือกจุดตัดที่ขอบเกรนเพื่อวัดขนาด   | 64   |
| 3.31   | รูปการทำ Report และบันทึกข้อมูล   | 65   |
| 3.32   | รูปแบบฟอร์มอมข้อมูล   | 65   |
| 4.1    | รูปลักษณะการขึ้นรูปเพื่อความเครียดผิวที่ มุม 30,40 และ 50 องศา  | 67   |
| 4.2    | รูปลักษณะของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนลากขึ้นรูปและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ลากขึ้นรูปแล้ว | 67   |
| 4.3    | รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา   | 69   |
| 4.4    | กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา   | 69   |
| 4.5    | รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา   | 70   |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.6    | กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา                                  | 71   |
| 4.7    | รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา                                | 71   |
| 4.8    | กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา                                  | 72   |
| 4.9    | รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา                        | 74   |
| 4.10   | กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่นไมล่าและโปรแกรมที่มุม 30 องศา (จุดที่ 2) | 75   |
| 4.11   | กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา  | 76   |
| 4.12   | รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา                        | 78   |
| 4.13   | กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่นไมล่าและโปรแกรมที่มุม 40 องศา (จุดที่ 2) | 78   |
| 4.14   | กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา  | 79   |
| 4.15   | รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา                        | 81   |
| 4.16   | กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่นไมล่าและโปรแกรมที่มุม 50 องศา (จุดที่ 2) | 82   |
| 4.17   | กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา  | 83   |
| 4.18   | รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองก่อนการขึ้นรูป   | 84   |
| 4.19   | รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา                                      | 85   |
| 4.20   | รูปการเปรียบเทียบ โครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 30 องศา กำลังขยาย 500X                             | 86   |
| 4.21   | รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา                                      | 87   |
| 4.22   | รูปการเปรียบเทียบ โครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 40 องศา กำลังขยาย 500X                             | 88   |
| 4.23   | รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา                                      | 89   |
| 4.24   | รูปการเปรียบเทียบ โครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 50 องศา กำลังขยาย 500X                             | 89   |
| 4.25   | อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 1                           | 91   |
| 4.26   | อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 2                           | 91   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.27   | อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 3        | 92   |
| 4.28   | กราฟอัตราความเครียดเทียบเท่าที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆในการขึ้นรูป จุดที่ 2 | 93   |
| 4.29   | กราฟอัตราการยืดตัวของเกรนที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆในการขึ้นรูป             | 95   |
| ก.1    | ผลการทดลองคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของแผ่นทองเหลืองที่นำมาทำการทดลอง         | 108  |
| ข.1    | ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา                                  | 110  |
| ข.2    | ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา                                  | 110  |
| ข.3    | ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา                                  | 110  |
| ค.1    | ภาพรวม โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา    | 120  |
| ค.2    | ภาพรวม โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา    | 129  |
| ค.3    | ภาพรวม โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา    | 138  |
| ง.1    | ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 30 องศา     | 140  |
| ง.2    | ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 40 องศา     | 141  |
| ง.3    | ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 50 องศา     | 142  |
| จ.1    | ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 30 องศา     | 152  |
| จ.2    | ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 40 องศา     | 161  |
| จ.3    | ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 50 องศา     | 170  |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\sigma$        | 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                      |
| AISI            | American Iron and Steel Institute  |
| AS              | Austrian Standards   |
| ASM             | American Society for Metals  |
| ASTM            | American Society of Testing Materials  |
| $e$             | ความเคียดเชิงเส้น  |
| $\Delta L$      | ความยาวที่เปลี่ยนไป ( $L - L_0$ )  |
| $L_0$           | ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length  |
| $\gamma$        | $\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่มุมเล็ก)                                       |
| $a$             | ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)   |
| $h$             | ระยะห่างระหว่างระนาบ   |
| $\theta$        | มุมที่เปลี่ยนไป  |
| $l_0$           | ความยาวแกนหลักเดิม   |
| $l_f$           | ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป   |
| $w_0$           | ความยาวแกนหลักเดิม   |
| $w_f$           | ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป   |
| $n$             | จำนวนของเม็ดเกรน   |
| V               | กำลังขยาย (เท่า)   |
| mm <sup>2</sup> | ตารางมิลลิเมตร   |
| $\sigma_y$      | ความเค้นจุดคราก  |
| $\epsilon_y$    | ความเคียดที่ตำแหน่งของจุดคราก  |

# บทที่ 1

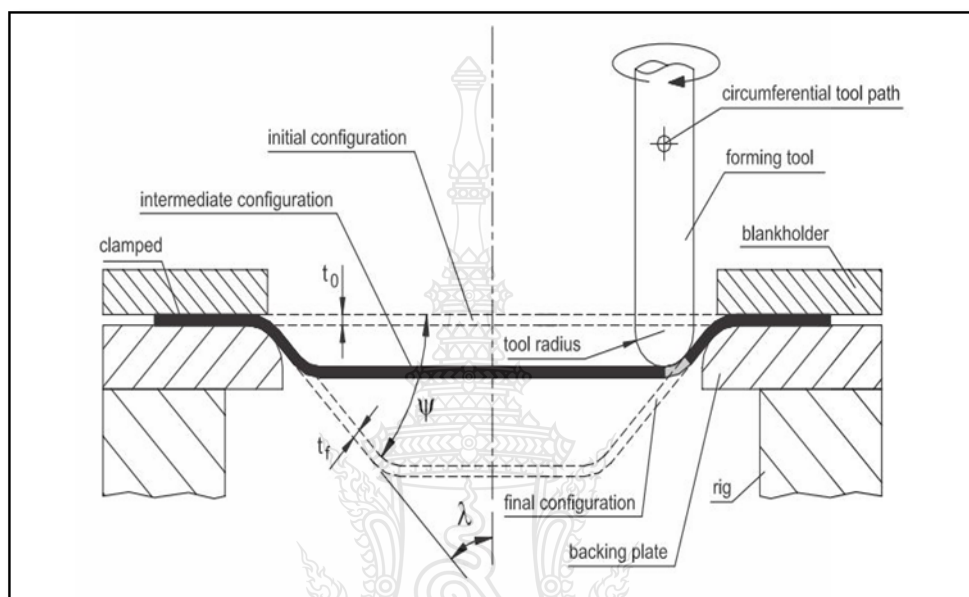
## บทนำ

### 1.1 แนวคิดหรือที่มาของโครงการ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นยังเป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการผลิต ซึ่งในการที่จะผลิตให้ได้ซึ่งการแปรรูปโลหะแผ่นให้มีขนาดรูปร่างให้เป็นไปตามที่ต้องการนั้น กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูป จะประกอบไปด้วยขั้นตอนในการทำงานในหลายๆ ส่วน เช่น ขั้นตอนการออกแบบ ขั้นตอน การผลิตการแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่ง แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีความซับซ้อนในการผลิต และมีราคาสูง และในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นต้องใช้เครื่องจักรกำลังในการทำงานสูงในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วย อีกทั้งด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะด้วยแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบเดิมนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนนั้น ทำให้การผลิตเพื่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เป็นไปตามแบบหรือผลิตภัณฑ์ เพื่อให้คุ้มค่าในการผลิต จึงจะต้องทำการผลิตเป็นจำนวนมากเพื่อให้ราคาผลิตภัณฑ์ต่อหน่วย มีราคาลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลิตภัณฑ์ เป็นไปได้อย่างล่าช้า ซึ่งขัดต่อความต้องการของ ผู้บริโภคในปัจจุบันซึ่งมีความต้องการ ความหลากหลายในรูปแบบ ของผลิตภัณฑ์ เป็นอย่างมาก

ดังนั้นจากปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีการนำเสนอแนวคิดใหม่ ในกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยไม่มีการใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูป [1] โดยในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบใหม่นั้น จะมีการใช้กำลังในการขึ้นรูปแผ่นโลหะน้อยกว่ากระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบเดิมเป็นอย่างมาก และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ก็มีขั้นตอนการผลิตที่มีซับซ้อนน้อยลง นั่นก็คือกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการสัมผัสเป็นจุดกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบใหม่ที่มีมีความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นได้อย่างรวดเร็ว และ มีความซับซ้อนในกระบวนการผลิตน้อยกว่าแบบเดิมมากทำให้สามารถตอบสนองต่อระบบเศรษฐกิจในปัจจุบันที่ความต้องการ ของผู้บริโภคมีความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยองค์ประกอบหลักของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด จะประกอบไปด้วย แผ่นโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูป, อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป, อุปกรณ์จับยึดแผ่นโลหะ และมีลักษณะการทำงานดังต่อไปนี้คือมีการใช้ อุปกรณ์ขึ้นรูป รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด

และทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) แล้วทำการกดขึ้นรูปลง บนพื้นผิวแผ่นชิ้นงาน โลหะที่ถูกจับยึด ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรเฉพาะจุดบนแผ่นโลหะ [2] ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด [3]

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะแผ่นทองเหลืองที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด จะทำการศึกษาการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุ ทองเหลืองแผ่น ซึ่งเป็นโลหะแผ่นที่มีความสามารถในการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ ได้สูงและนิยมใช้งานในอุตสาหกรรมหลายๆประเภทในปัจจุบันโดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปของโลหะแผ่น เช่นมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบลักษณะการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น โดยวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เพื่อศึกษาการไหลตัวของเนื้อโลหะแผ่นทองเหลืองต่ออิทธิพลของตัวแปรในการขึ้นรูป และสามารถนำไปเป็นแนวทางและทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด ต่อไป



## 1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความหนาและความเครียดในการขึ้นรูปแผ่นทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของทองเหลืองที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

## 1.3 ขอบเขตโครงการ

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นทองเหลืองที่มีส่วนผสม Cu เท่ากับ 61.34 % และ Zn เท่ากับ 38.4% ความหนา 0.6 มิลลิเมตร ขนาด 90 มิลลิเมตร  $\times$  150 มิลลิเมตร

1.3.2 ชิ้นงานทดลองโดยกำหนดมุมที่ใช้ในกดการขึ้นรูป

- 1) 30 องศา
- 2) 40 องศา
- 3) 50 องศา

1.3.3 ชิ้นงานทดลองโดยใช้ความเร็วในการหมุนของ อุปกรณ์ที่ใช้ในกดการขึ้นรูป (Punch)

- 1) 200 รอบ ต่อ นาที
- 2) 400 รอบ ต่อ นาที
- 3) 600 รอบ ต่อ นาที

1.3.4 ชิ้นงานทดลองโดยใช้อัตราการเคลื่อนที่ของ อุปกรณ์ที่ใช้ในกดการขึ้นรูป (Punch)

- 1) 100 มิลลิเมตรต่อ นาที
- 2) 200 มิลลิเมตรต่อ นาที
- 3) 400 มิลลิเมตรต่อ นาที

1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูป เป็นวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ ตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร ปลายมีรัศมี 10 มิลลิเมตร

1.3.6 สารหล่อลื่นที่ใช้ จาระบี เกรด SG-306 Red No.3

1.3.7 ทำการวัดอัตราความเครียดและความหนาชิ้นงาน

1.3.8 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจถึงกระบวนการผลิตของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากวัสดุผสมซึ่งได้จากการผสมระหว่างกาบปาล์มและโฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane Foam)

1.4.2 ช่วยลดสภาวะโลกร้อนและลดการทำลายธรรมชาติ

1.4.3 ช่วยให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มจากการขายกาบปาล์ม

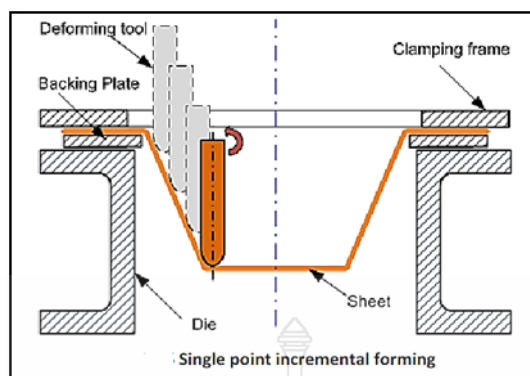


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวความคิด

จากการค้นคว้าพบว่าในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรเฉพาะจุด บนแผ่นโลหะ โดยใช้อุปกรณ์ขึ้นรูป รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [3] โดยในจุดที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวรนั้นเป็นพื้นที่เล็กๆที่เกิดจากการสัมผัสกันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับพื้นผิวของแผ่น โลหะซึ่งก่อให้เกิดความเค้นกดขึ้นเป็นผลให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยในปัจจุบันนี้ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ และยังมีปัจจัยต่างๆในการทำงานที่ต้องศึกษา เพื่อให้เกิดกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพและเป็นระเบียบแบบแผนในการทำงาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการ สำหรับโครงการนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด จะทำการศึกษากการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุทองเหลืองแผ่น ซึ่งเป็น โลหะแผ่นที่มีความสามารถในการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆได้สูงและนิยมใช้งานในอุตสาหกรรมหลายๆประเภทในปัจจุบัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปของโลหะแผ่น เช่น มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ รวมไปถึงโครงสร้างจุลภาคที่มีผลจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบลักษณะการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น พร้อมวิเคราะห์ลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้น ในส่วนของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นโลหะ, ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของโลหะแผ่นทองเหลืองที่ผ่านการขึ้นรูปและ โครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการศึกษาวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น และยังเป็นทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุดต่อไป ซึ่งมีลักษณะการทำงาน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด [2]

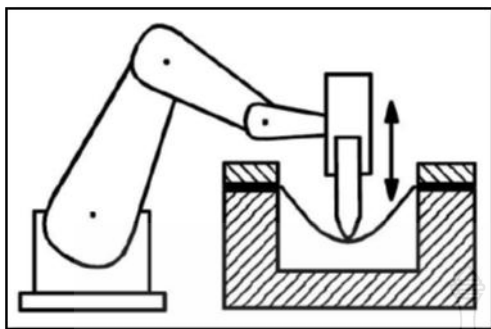
## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในลักษณะต่าง ๆ

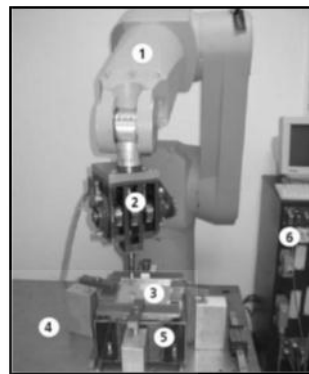
มีกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นหลายๆแบบที่ใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยกรรมวิธีนี้ ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อ เทียบกับกระบวนการขึ้นรูปแบบเดิม โดยบางส่วนของกระบวนการที่จะกล่าวถึง จะมีลักษณะการทำงานพื้นฐานที่คล้ายคลึงกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะกล่าวถึงภาพรวมโดยย่อของทางเทคนิคของ กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

### 2.2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป

การกดขึ้นรูปเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่เก่าที่สุด การกด หมายถึง การทำให้โลหะต่างๆ ให้เป็นรอยนูนขึ้นคล้ายๆ กรรมวิธีการปั๊ม ในอดีตการกดขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ต้องกระทำด้วย ที่ต้องอาศัยความชำนาญ ความสามารถเฉพาะ ต้องใช้เทคนิคของช่าง แต่ละคน แต่ในปัจจุบัน กระบวนการกดขึ้นรูปโลหะ ได้มีการนำเทคโนโลยี CNC และเทคโนโลยีการใช้หุ่นยนต์มาควบคุมในการทำงาน ในการเคลื่อนที่ไปในจุดต่างๆ แล้วทำการกดลงบนพื้นผิวโลหะที่ถูกทำการจับยึด ในแต่ละขั้นตอน ของการทำงานที่ถูกกำหนด ดังรูปที่ 2.2



(ก) ลักษณะของการกดขึ้นรูป

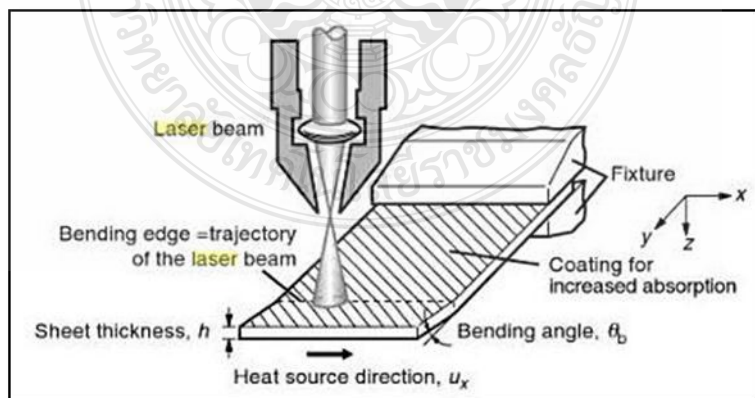


(ข) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

รูปที่ 2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป [2]

### 2.2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์

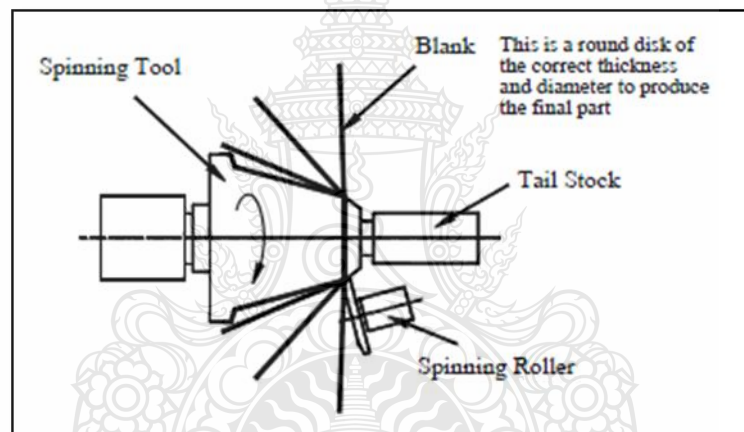
การขึ้นรูปวัสดุด้วยเลเซอร์ หรือ Laser Forming ถือเป็นกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางกลและทางความร้อน (Thermo-mechanical Forming Process) โดยหลักการของ (Laser Forming) คือการฉายลำแสงเลเซอร์ลงบนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดความเครียดบนพื้นผิวแผ่นโลหะที่ถูกจับยึด ด้วยความร้อนจากการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิว และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจะเกิดการโค้งงอของวัสดุ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



รูปที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์ [2]

#### 2.2.4 กระบวนการปั่นขึ้นรูป

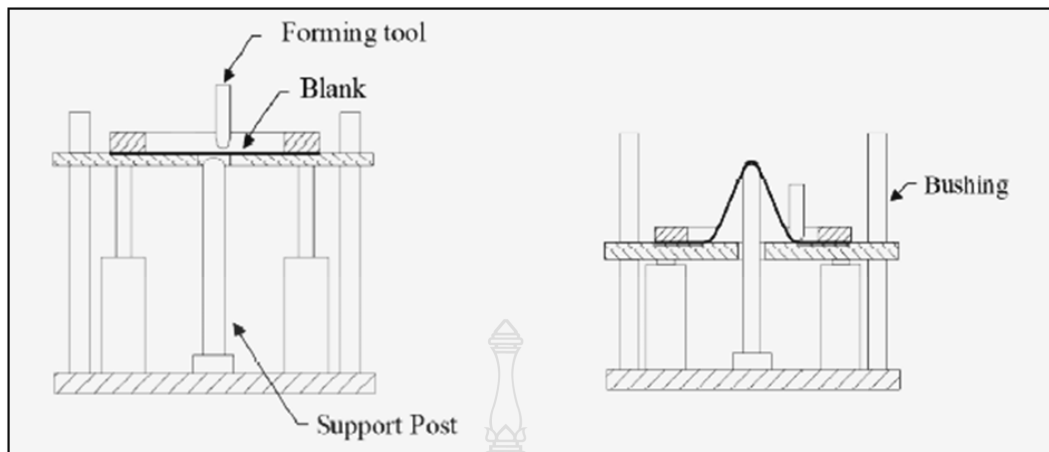
การขึ้นรูปโลหะแผ่นบางที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโพรงในรูปทรงต่างๆ การขึ้นรูปจะเริ่มขึ้นโดยการนำแผ่นขึ้นงานกลม (Blank) มาติดกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ให้มีจุดศูนย์กลางตรงกันแล้วจึงนำศูนย์ท้ายแทน มากดให้แผ่นขึ้นงานแนบสนิทกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ขั้นต่อไปจะหมุนแม่พิมพ์สปินนิ่งทำให้แผ่นขึ้นงานและศูนย์ท้ายแทนหมุนตามไปด้วย หลังจากนั้นจึงนำลูกกลิ้งมารีดแผ่นขึ้นงานให้แนบไปตามแม่พิมพ์สปินนิ่ง แผ่นขึ้นงานจะค่อยๆ ถูกขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องในบริเวณเล็กๆ ที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับแผ่นขึ้นงานตามการเคลื่อนที่ของแผ่นขึ้นงานรอบๆ แกนการหมุนของแม่พิมพ์สปินนิ่ง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั่นขึ้นรูป [2]

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

ในปี 1994 ได้มีพัฒนาโดย Matsubara กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการใช้การกระตุ่งขึ้นจากด้านล่างโดยให้แผ่นขึ้นงานทดสอบถูกจับยึดบนแท่นที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้ โดยตรงกลางของแผ่นขึ้นงานจะถูกรองรับ โดย แท่นรองรับหรือทูล และมันจะถูกควบคุมความเร็วในการหมุนโดยเครื่องจักร CNC และแท่นที่ใช้จับยึดขึ้นงานก็จะถูกกดลงสู่ด้านล่างตามระยะที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 2.5 โดยกรรมวิธีนี้สามารถผลิตขึ้นงานได้ทั้งในลักษณะที่มีรูปทรงสมมาตร และรูปทรงไม่สมมาตร[2]

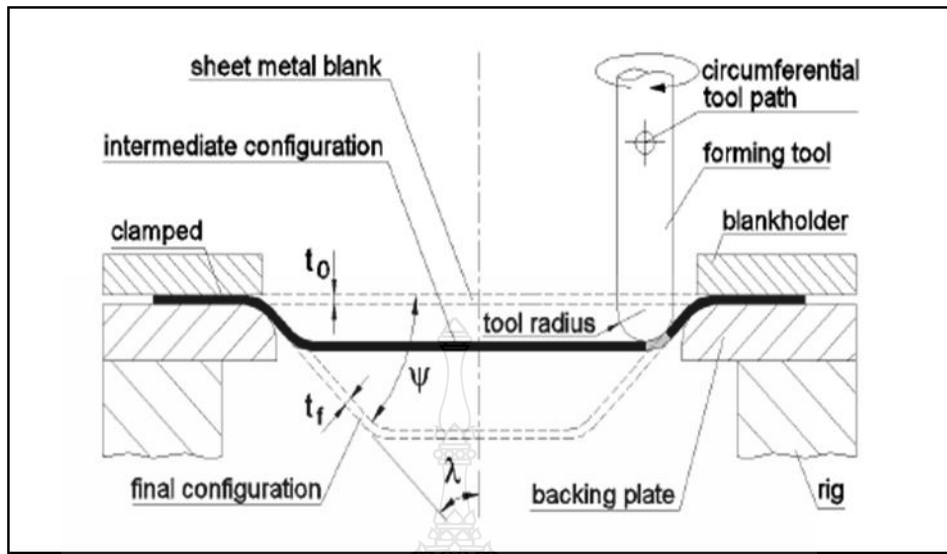


รูปที่ 2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง [2]

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

#### 2.2.6 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

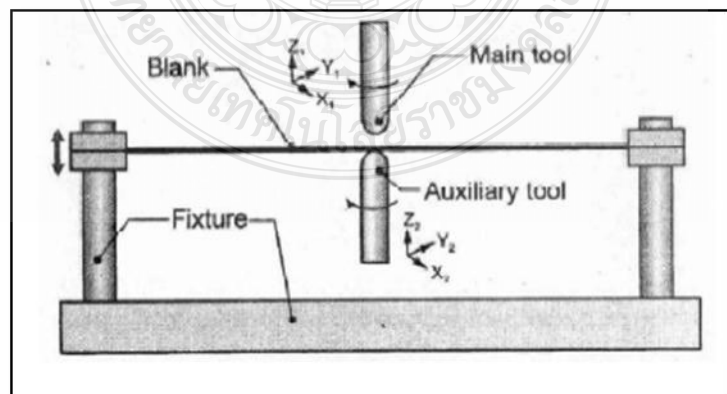
กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นลักษณะการทำงานแนวใหม่ในการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง โดยมีลักษณะคล้ายกับการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูป และการดึงขยายชิ้นงาน ซึ่งมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรอีกด้วย โดยแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยชุดจับยึดและถูกกดขึ้นรูปโดยหัวกดลงไปทำให้เกิดการเสียรูปถาวรเฉพาะจุด บนแผ่นโลหะ โดยใช้ทูล รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วยระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [3] โดยในจุดที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวรนั้นเป็นพื้นที่เล็กๆที่เกิดจากการสัมผัสกันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับพื้นผิวของแผ่น โลหะซึ่งก่อให้เกิดความเค้นกดขึ้นเป็นผลให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด [2]

### 2.2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงานจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ที่ไม่มีการใช้แผ่นรองยึดด้านล่างและใช้อุปกรณ์ในการขึ้นรูปเสริมในด้านล่างของแผ่นชิ้นงานและเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันอุปกรณ์ขึ้นรูปหลัก ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ [2]

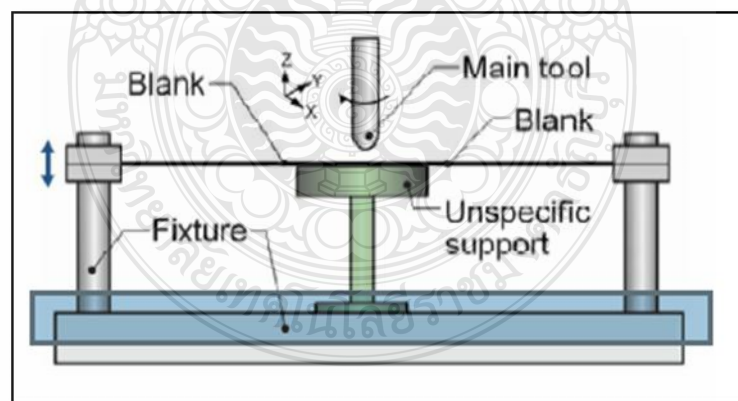


### 2.2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดบนชุดสวมจุดที่สามารถปรับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวแกน Z โดยใช้ทูลในการขึ้นรูปที่มีรูปร่างในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยให้ทูลทำการกดลงบนของแผ่นชิ้นงานด้านบนจากบนลงล่างตามลักษณะรูปทรงของชิ้นงานที่กำหนด โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ถูกแบ่งลักษณะการทำงานเป็น 2 แบบ ตามลักษณะของ แม่พิมพ์ที่เปลี่ยนไป คือ แบบแม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน, และ แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน

### 2.2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน)

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ แผ่นรองหลัง ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด เพียง แต่มันจะทำการรองรับเฉพาะพื้นที่ที่กำหนดของแผ่นชิ้นงาน และกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงของรูปทรงของชิ้นงาน ในลักษณะของงานที่มีการขึ้นรูปด้วยรูปทรงที่ไม่ตรงตามแบบทางเรขาคณิต อีกทั้งยังสามารถนำ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน ไปผลิตชิ้นงานอื่นๆ ที่มีความคล้ายคลึงได้ต่อไปอีกด้วย มีลักษณะการทำงาน ดังรูปที่ 2.8

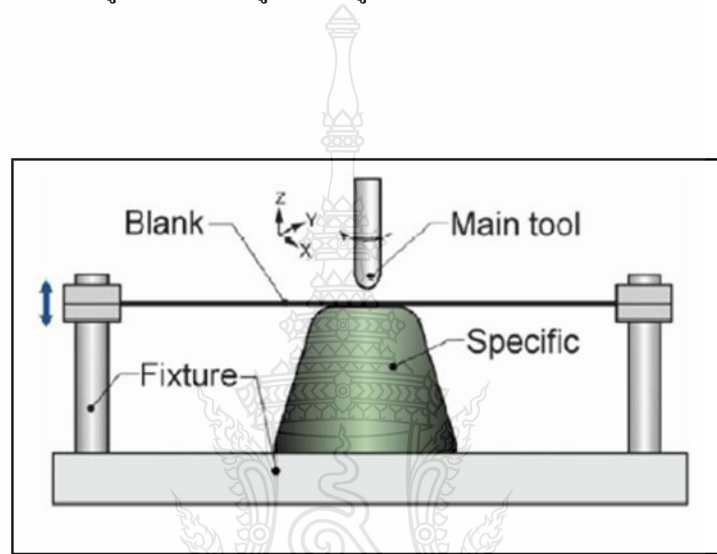


รูปที่ 2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์เฉพาะส่วน) [2]

### 2.2.10 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ (แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน)

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

2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแบบแม่พิมพ์เต็ม [2]

### 2.2.11 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

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 มักจะ

กล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักและใช้งานกันอยู่เป็นประจำซึ่งมีอยู่ไม่มากนัก โดยแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้[4]

1) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสีไม่เกิน 5% (95 Cu-5 Zn) มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Gilding metal ใช้ทำเหรียญ

2) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 10% (90 Cu-10 Zn) มีชื่อเรียก Commercial bronze หรือ บรอนซ์ ทางการค้าความจริงเป็นทองเหลือง คุณสมบัติและการใช้งานคล้ายคลึงกับ Gilding metal

3) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 12.5% (87.5 Cu-12.5 Zn) มีชื่อเรียก Jewelry bronze หรือ ทองเหลืองทำเครื่องประดับ

4) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 15% (85 Cu-15 Zn) มีชื่อเรียก Red Brass หรือ ทองเหลืองแดง

5) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 20% (80 Cu-20 Zn) มีชื่อเรียก Low brass หรือ ซึ่งไม่หมายถึงทองเหลืองชั้นคุณภาพต่ำตามความหมาย

6) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 30% (70 Cu-30 Zn) มีชื่อเรียก Cartridge brass หมายถึงทองเหลืองที่ใช้ทำปลอกกระสุนปืน ทำท่อที่ต้องอาศัยการอัดขึ้นรูป(Extrusion)

7) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 35% (65 Cu-35 Zn) มีชื่อเรียก Yellow brass หมายถึงทองเหลืองที่มีสีค่อนข้างจัด คุณสมบัติและการใช้งานใกล้เคียงกับ Cartridge brass

8) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 40% (60 Cu-40 Zn) มีชื่อเรียก Muntz metal คงจะเป็นชื่อทางการค้า

#### 2.2.12 วัสดุที่ใช้เป็นเครื่องมือในการกดขึ้นรูป

เหล็กกล้าเครื่องมือมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น วัสดุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และ โมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ ในระดับสูง และโครงสร้าง เเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ ภายหลังจากชุบแข็งและอบคืนตัว (Tempering) ซึ่งมีคุณลักษณะทั่วไป ดังตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของ

เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสที่ต่ำมากและมีความเหนียวที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่น ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นๆ (Significant Characteristics) ดังนี้

- 1) มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมาก
- 2) มีความเหนียวแรงพอใช้
- 3) ชุบแข็งได้ลึก มีความสามารถในการชุบแข็งสูงมาก และชุบแข็งในเตาสุญญากาศได้
- 4) ต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี
- 5) เกิดการบิดงอเล็กน้อยมากหลังการชุบแข็ง
- 6) ต้านทานการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ดี
- 7) สามารถทำไนไตรดิงหลังการชุบแข็งได้
- 8) สามารถเคลือบผิวด้วยเทคนิคพีวีดีได้

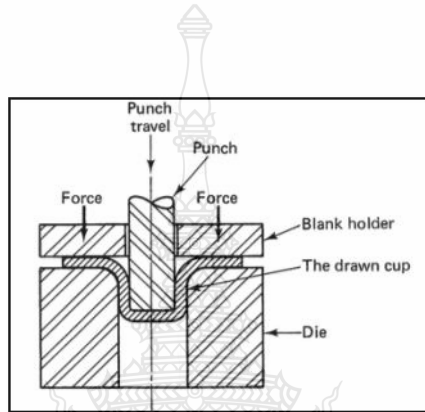
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics) ของเหล็ก JIS SKD 11 หรือเหล็ก DIN 1.2379

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

### 2.2.13 ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing operation)

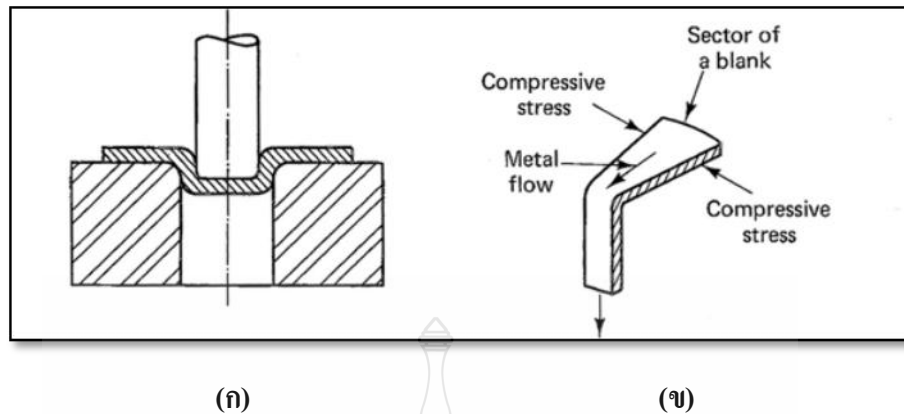
การดึงขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์รูปถ้วย หรือรูปเปลือกที่มีขอบสูง จากโลหะแผ่น ดังแสดง ในรูปที่ 2.10 เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยชุดแม่พิมพ์ ที่มีขอบพื่นซ์และคายเป็น

รัศมีโค้ง ( $R > t$ ) เมื่อมีแรงกดกระทำที่ แผ่นโลหะชิ้นงานผ่านพื้นที่ แผ่นโลหะชิ้นงานจะไหลเข้าสู่ช่องเปิดคายตามแนวรัศมีเข้าหาศูนย์กลางและเปลี่ยนรูป จากแผ่นเป็นชิ้นงานรูปเปลือก การศึกษาในเรื่องของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกเป็นเรื่องที่ซับซ้อน การที่จะทำความเข้าใจง่ายขึ้นนั้นจะแบ่งออกเป็นการศึกษาส่วนของกระบวนการ และในที่นี้เราจะกล่าวถึงการศึกษาส่วนของกลไกการขึ้นรูปในการขึ้นรูปลึก



รูปที่ 2.10 แนวคิดพื้นฐานในการดึงขึ้นรูปลึก [5]

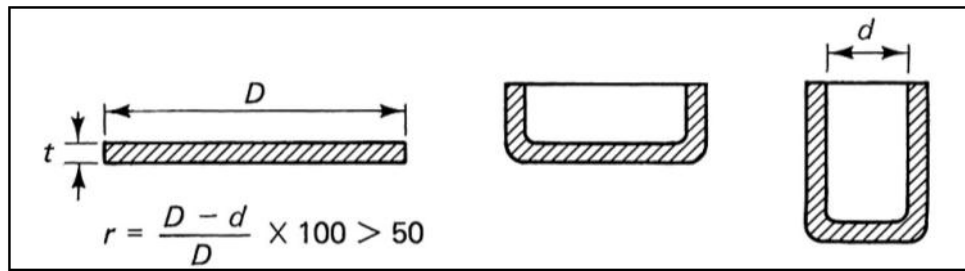
กลไกการดึงขึ้นรูปลึก (Mechanics of Deep Drawing) เมื่อพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นกระบวนการ จากรูปที่ 2.11(ก) แผ่นวัสดุจะเริ่มถูกตัดที่บริเวณรัศมีขอบคาย และเมื่อเพิ่มภาระกระทำที่ตัวพื้นที่ให้มากขึ้น ทำให้แผ่น โลหะที่ถูกตัดบริเวณรัศมีคายจะถูกดึง (หรือดัดกลับ) ให้เป็นเส้นตรงอยู่ระหว่างช่องว่างของพื้นที่และคาย เกิดเป็น ผงหรือเปลือกของชิ้นงานรูปถ้วยเดี่ยว ๆ หลังจากนั้น แผ่นโลหะที่อยู่ด้านนอกจะเริ่มไหลเข้าช่องเปิดคายมากขึ้น แต่เนื่องจากที่ผิวด้านล่างของแผ่นโลหะที่สัมผัสอยู่กับผิวคายทำให้เกิดแรงเสียดทานต้านทานการไหลของแผ่นโลหะ



รูปที่ 2.11 กลไกการดิ่งขึ้นรูปลึก (ก) ช่วงแรกของการดิ่งขึ้นรูปซึ่งจะเกิดเฉพาะการตัด  
(ข) บริเวณที่เกิดความเค้นอัดในระหว่างกระบวนการ [6]

จากกลไกดิ่งที่กล่าวกระบวนการดิ่งขึ้นรูปประกอบไปด้วยช่วงการรับภาระลักษณะต่างๆ กันของแผ่นโลหะ คือ ช่วงการตัด ช่วงการดิ่งให้ตรง (หรือการตัดกลับ) ส่งผลให้การเสียรูปอย่างถาวรของแผ่นโลหะเกิดขึ้นไม่เท่ากัน จากรูปที่ 2.11(ข) แผ่นโลหะที่บริเวณปีก (หรือขอบชิ้นงาน) ก่อนไหลเข้าสู่ช่องเปิดคายจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวง ในขณะที่ส่วนที่ไหลผ่านบ่าคายจะมีความหนาลดลงเนื่องจากความเค้นแรงดิ่งในแนวรัศมี ส่วนที่บางที่สุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของผนัง ด้วยเหตุนี้ถ้าในระหว่างกระบวนการดิ่งขึ้นรูป ชิ้นงานมักจะเสียหายจากการฉีกขาดที่บริเวณ ผนัง ก้นด้วยเป็นส่วนใหญ่

ในอุตสาหกรรมการผลิตถ้าต้องการชิ้นงานรูปถ้วยที่มีคุณภาพดี ไม่มีการฉีกขาดจะใช้ค่า  $r$  น้อยกว่า 50% ในกรณีที่ต้องการดิ่งขึ้นรูปลึกมาก (ค่า  $r$  มากกว่า 50%) จะทำการดิ่งขึ้นรูปสองครั้ง จากรูปที่ 2.12 ชิ้นงานที่ได้จากการดิ่งขึ้นรูปครั้งแรกจะใช้ค่า  $r$  ต่ำกว่า 50% จากนั้นจึงนำมาดิ่งขึ้นรูปซ้ำ ครั้งที่สองจะกำหนดที่ 20% และครั้งที่ 3 จะกำหนดที่ 13% ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ดิ่งขึ้นรูปซ้ำมากกว่า 3 ครั้ง ขึ้นไป ต้องนำชิ้นงานไปทำการอบอ่อนทุกๆ 2 ครั้ง การดิ่งขึ้นรูป เสมอ เพื่อขจัดผลจากความเครียดแข็ง และหลีกเลี่ยงการแตกร้าว และเสียหายของ ผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.12 การดัดขึ้นรูป และการดัดขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า  $r > 50\%$  [5]

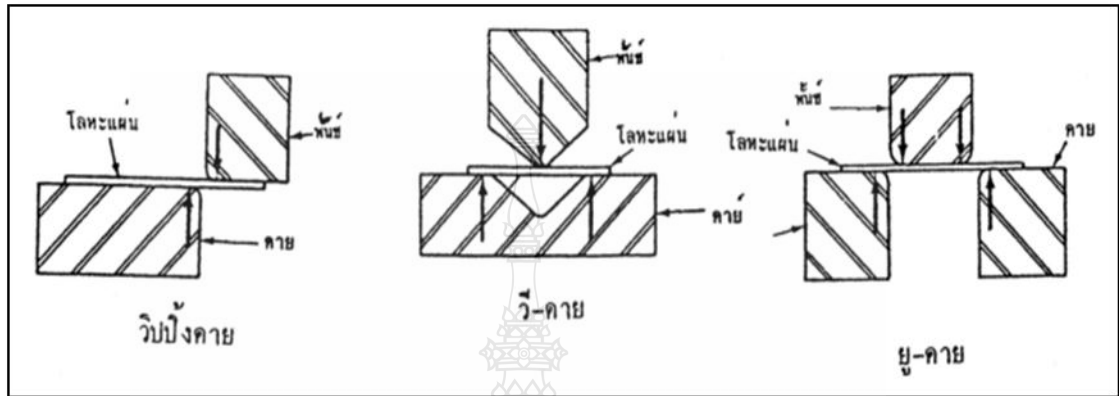
#### 2.2.14 ทฤษฎีการขึ้นรูปงานโลหะแผ่นโดยการดัดงอ [7]

ขบวนการในการขึ้นรูปโลหะทั้งหมดนั้นนับว่า ขบวนการงอขึ้นรูป (bending) เป็นการที่ง่ายที่สุดที่ใช้งานกับเครื่องปั๊มโลหะ ซึ่งขบวนการงอขึ้นรูปนี้อาจทดลองได้โดยใช้เครื่องมือง่ายๆ ภายในบ้านก็ทำได้ ขบวนการงอขึ้นรูปนั้นเป็นขบวนการอันหนึ่งในหลายๆ ขบวนการของขบวนการงอขึ้นรูปโดยการดัดงอ ซึ่งขบวนการนี้จะถูกใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาถึงสภาพของการขึ้นรูปขึ้นงานที่ใช้ในบพนี้ ขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดงอนั้นมีกรรมวิธีที่แตกต่างไปจากขบวนการตัดขึ้นรูป (cutting) และขบวนการลากขึ้นรูป (drawing) เป็นอย่างมาก

##### 1) ทฤษฎีการงอ (Bending Theory)

ในการขึ้นรูปโลหะโดยการงอขึ้นรูปนั้น เราต้องให้แรงแก่ชิ้นงานทั้งนี้ เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมากกว่าความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัดของชิ้นงานนั้นเมื่อเราให้แรงแก่ชิ้นงานเพื่อทำการงอจะปรากฏว่าความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากบางจุดที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของ โลหะนั้น และความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน ซึ่งขณะที่แผ่กระจายนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานก็จะค่อยๆ ลดลงด้วยจนถึงบริเวณที่ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการเกิดความเค้นบนชิ้นงานแบบนี้จะทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานมากกว่าจะเกิดการฉีกขาด สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของโลหะนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะต้องผ่านจุดยืดหยุ่นจำกัดและจุดล้าตัวด้วย จากรูปที่ 2.13 นั้น เป็นการแสดงถึงการเกิดแรงที่ใช้ในการงอบนด้ายชนิดต่างๆ กัน สำหรับวี-ด้าย (V-die) นั้นเราจะพบว่ามีการแผ่กระจายของแรงเกิดขึ้นมากที่สุด ส่วน ยู-ด้าย (u-die) และวีปิ้ง-ด้าย

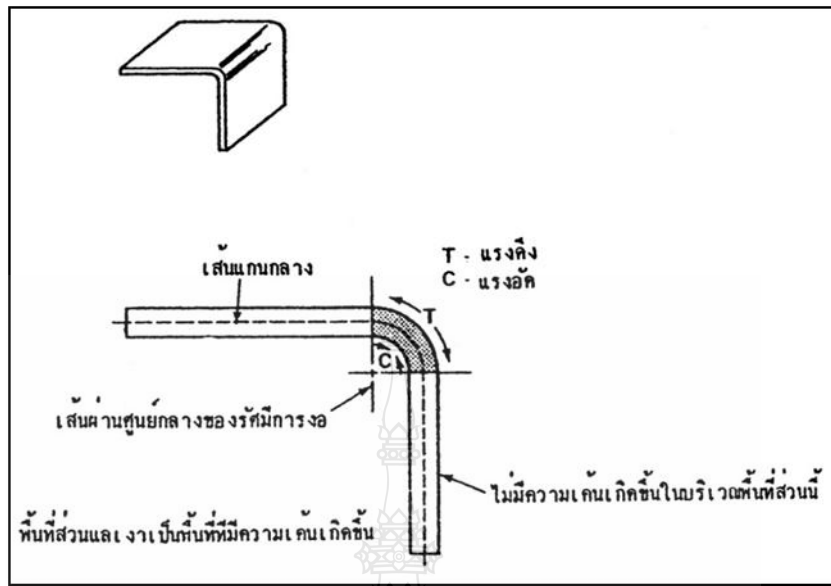
(Wiping-die) นั้นนิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานมาก และยู-คาย มักจะนิยมเรียกว่า ชาเนล คาย (channel die)



รูปที่ 2.13 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการงอขึ้นรูป [7]

การงอ (bending) นั้นมีลักษณะความแตกต่างของการเกิดความเค้นของโลหะเฉพาะที่เท่านั้น ความเค้นที่เกิดเฉพาะที่นี้จะเกิดขึ้นตรงรัศมีของการงอของชิ้นงานเท่านั้น ส่วนพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่เหลือนั้นจะไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลย จากรูปที่ 2.14 นั้น เป็นการแสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านขบวนการงอมาแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานนั้นเราจะสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่อยู่ด้านนอกของรัศมีการงอจะยืดออกแสดงให้เห็นว่ามีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีการงอจะหดตัวเข้า แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นอัดเกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดปรากฏขึ้นระหว่างการงอมักจะเกิดขึ้นที่ส่วนนอกของการงอ แต่ถ้ามีรอยขุ่น (wrinkle) ปรากฏขึ้นมันจะเกิดขึ้นที่ด้านในของการงอ

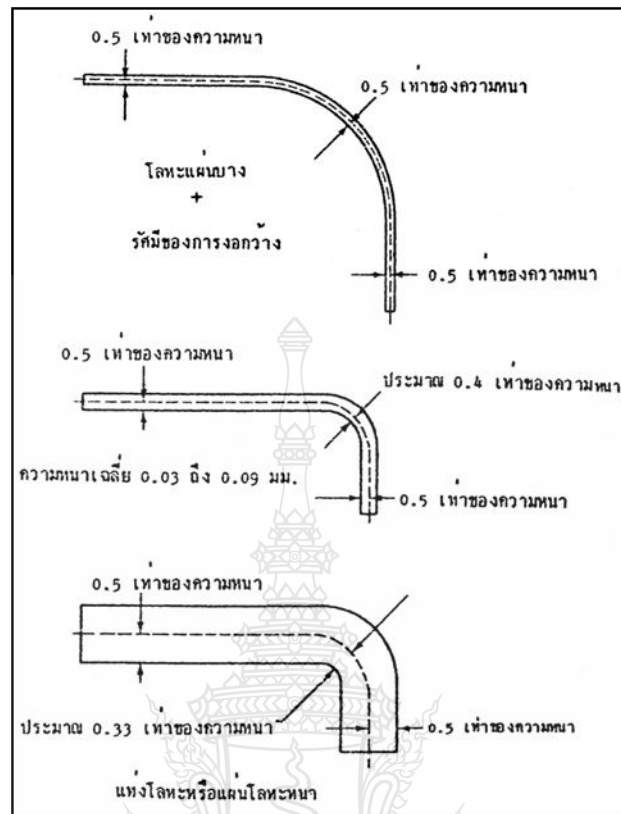




รูปที่ 2.14 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ [7]

## 2) เส้นแกนกลาง (Neutral Axis)

ทั้งนี้เพราะว่าที่ชิ้นงานนั้นได้เกิดความเค้นดึงขึ้นที่ด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งนั้นได้เกิดความเค้นอัดขึ้นการกลับตรงข้ามของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุดตรงบริเวณด้านขอบนอกทั้งสองข้างของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อยๆลดลงๆ เมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งที่เส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ๆ เส้นแกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์คือไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มีมีความเค้นเกิดขึ้นเลยเราเรียกว่า “เส้นแกนกลาง” (neutral axis)



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง [7]

### 3) การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)

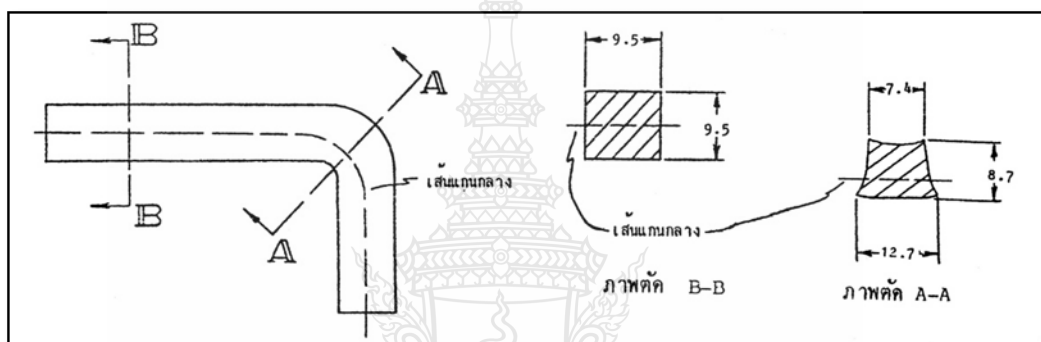
เพราะว่าโลหะบริเวณที่เราอนั้นได้มีความเค้นเกิดขึ้นซึ่งมันจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะ ความเค้นดึงที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปทำให้ความหนาของชิ้นงานในบริเวณที่งอมีขนาดลดลง ส่วนความเค้นอัดที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปเพิ่มขนาดความกว้างของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.15 จากรูปเป็นการแสดงถึงการบิดงอของแหงโลหะเมื่อได้รับการงอ

ลักษณะของการไหลตัวของโลหะระหว่างการขึ้นรูปโดยการดัดงอ มีดังต่อไปนี้

- ถ้าแหงโลหะได้ถูกนำมางอจะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก และจะมีการไหลตัวของโลหะทำให้ความหนาของแหงโลหะลดลงเล็กน้อย แต่จะไปเพิ่มทางด้านกว้างมากขึ้น

• ถ้าโลหะแผ่นได้ถูกนำมางอจะมีการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดเล็กน้อย แต่ความหนาจะลดลงอย่างมากและไม่มี的增加ตัวขึ้นทางความกว้างเลย

เมื่อเรางอโลหะแผ่น โอกาสที่จะเกิดการบิดงอมีมาก ทั้งนี้เพราะว่าการมีอัตราความกว้างมากต่อความหนาที่น้อย ส่วนรอยย่นจะปรากฏขึ้นเสมอเมื่อเรางอโลหะแผ่นหรือแท่งโลหะอย่างแรง ทั้งนี้เพราะว่าอัตราความกว้างน้อยต่อความหนามากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มทางด้าน การอัดตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การไหลของโลหะและการบิดงอ [7]

ขนาดของการไหลตัวของโลหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่างๆ คือ

- เมื่อรัศมีของการงอ (bend of radius) ยาวขึ้นจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- โลหะที่บางกว่าจะเกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- มุมของการงอ (degree of bend) แคบจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- ถ้าเป็นการงอช่วงแคบ (narrow bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีน้อย แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีมาก
- ถ้าเป็นการงอช่วงกว้าง (wide bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีมาก แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีน้อย
- ถ้าเป็นโลหะแข็งจะมีการไหลตัวของโลหะทางด้าน การดึงตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะฉีกขาดได้ง่าย

• ถ้าเป็นโลหะที่อ่อนจะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้านการอัดตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยร่นได้ง่าย

### 2.2.15 สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการดึง (Mechanical properties tension)

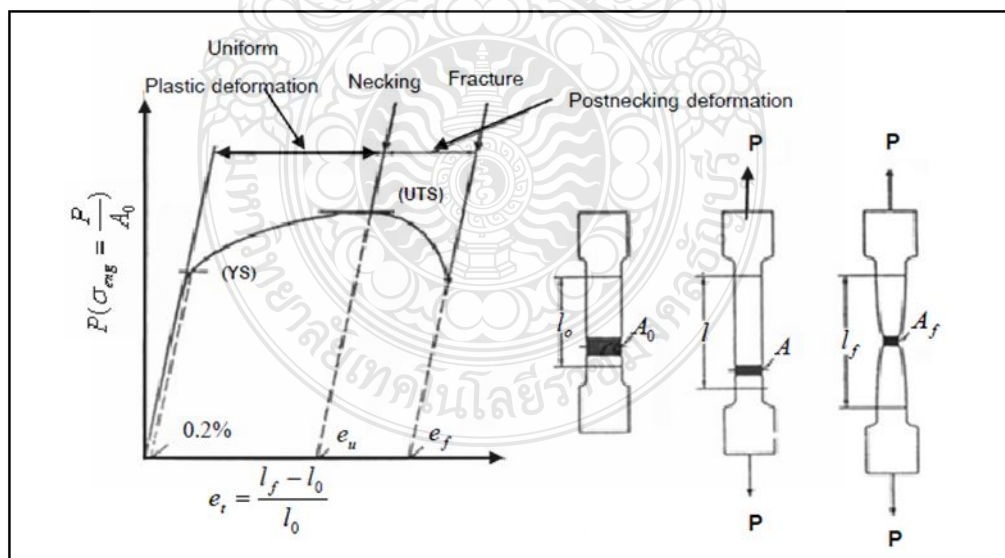
สมบัติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดของผลิตภัณฑ์คือ ความสามารถในการรับแรง (Loads) การกระทำของแรง มีหลายประเภทเช่น แรงใช้งาน (Service Load) แรงสถิต (Static Load) เป็นต้น

#### 1) การทดสอบการดึง (Tension Test)

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

#### 2) เส้นโค้งความเค้นกับความเครียด (Stress-strain Curve)

ในระหว่างการทดสอบการดึง ทั้งโหลดและความยืด (Elongation) เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องวัดการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความยืด จากนั้นจึงนำมาเขียนแผนภาพแรงกับการกระจัด (Force-displacement Diagram) ดังรูปที่ 2.17 (ก) ซึ่งเป็นรูปแบบของโลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้า ที่ทดสอบในอุณหภูมิปกติ



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 2.17 การทดสอบการดึง (ก) ความเค้นกับการกระจัดที่หาได้จากการทดสอบวัสดุเหนียว (ข) ชิ้นทดสอบหน้าตัดขวางเดิม (ค) เปลี่ยนรูปอย่างพลาสติก – สม่่าเสมอในช่วงความยาวทดสอบ และ (ง) การคอดและขาด [2]

### 3) ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m<sup>2</sup>) หรือ kgf/mm<sup>2</sup>

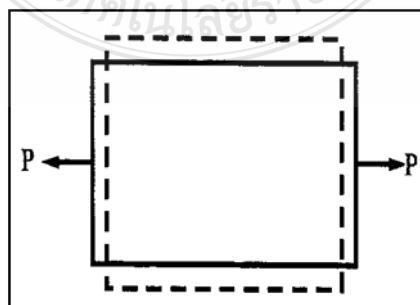
P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m<sup>2</sup> หรือ mm<sup>2</sup> หรือ

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำโดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

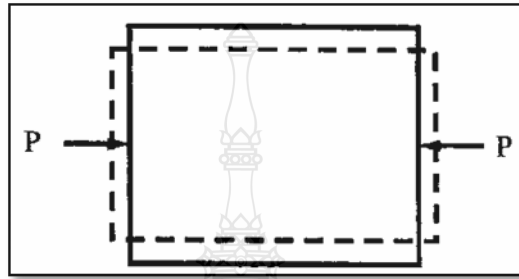
- ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่

ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.18



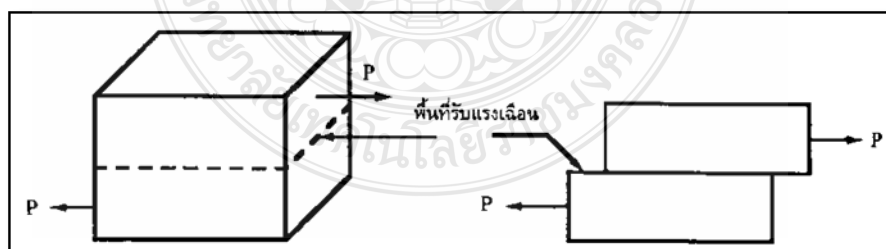
รูปที่ 2.18 แรงดึง (Tensile) [2]

- ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แรงกด (Compression) [2]

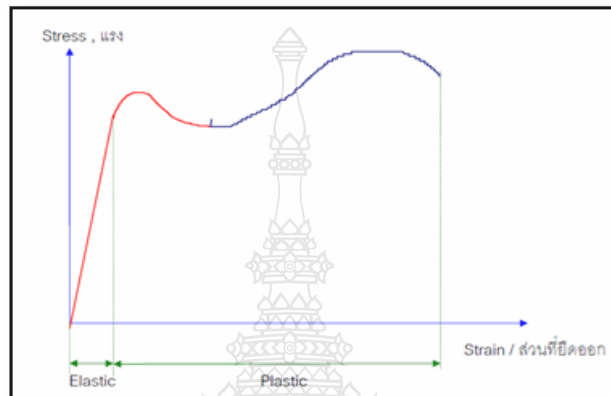
- ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูป มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือนดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แรงเฉือน (Shear) [2]

### 2.2.16 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) ดังรูปที่ 2.21 การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ



รูปที่ 2.21 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ [2]

1) การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

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

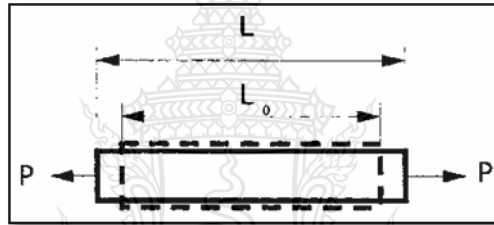
วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำหรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภท โพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่า ความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)

จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 2.22 ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการที่ 2.2

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $e$  = ความเครียดเชิงเส้น  
 $\Delta L$  = ความยาวที่เปลี่ยนไป ( $L - L_0$ )  
 $L_0$  = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length



รูปที่ 2.22 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) [2]

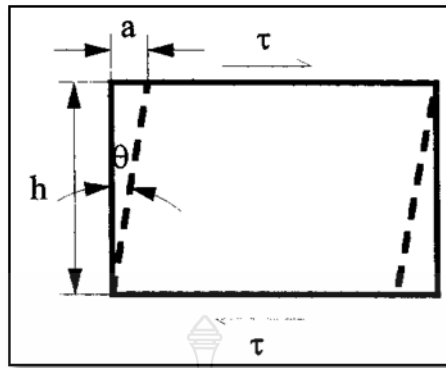
- แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำ

มีลักษณะเป็นแรงเฉือน ( $\tau$ ) ดังรูปที่ 2.23 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการที่ 2.3

$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.3)$$

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



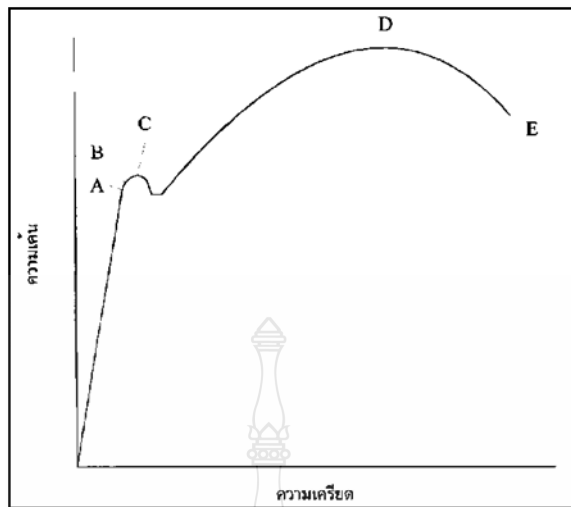


รูปที่ 2.23 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) [2]

จะเห็นได้ว่าค่าของความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว

#### 2.2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี่เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 2.24 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.24 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [6]

### 2.2.18 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation of material)

กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่ วัสดุได้รับแรงมากระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรูปร่าง ถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตาม ก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

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

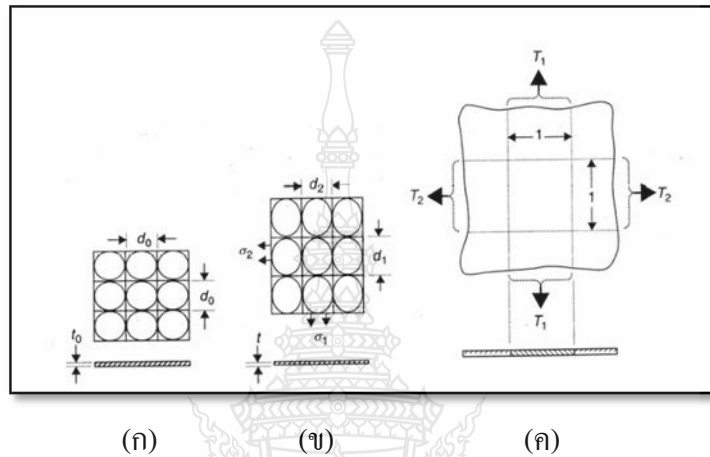
2) ทวินนิง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูป อันเนื่องมาจากระยะหรือ แนวของผลึกเกิดการถูกเอียง ให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกัน หรือเหมือนกัน โดยที่ ทิศทางการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลยทีเดียว

3) ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรง มาจากภายนอกเข้ามากระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง

2.2.19 การวัดค่าอัตราความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening)

ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปใน จากรูปที่ 2.25 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา  $t_0$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_0$  หรือตารางขนาด  $d_0$  ดัง

รูปที่ 2.25 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ  $d_1$  แกนของ Minor คือ  $d_2$  ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.25 (ข) ส่วนความหนา คือ  $t$  ดังรูปที่ 2.25(ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$



รูปที่ 2.25 ลักษณะตารางวงกลมกริดบนโลหะแผ่น (ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลม (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปร่างรี ขนาดของแกนหลักคือ  $d_1$  และขนาดแกนรอง คือ  $d_2$  (ค) การดึง,  $T$ , หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง [6]

ค่าความเครียดสูงสุดของความเครียดหลักและความเครียดรองสามารถกำหนดโดยการวัดความเครียดบนแผ่นโลหะด้วยการใช้ กริดวงกลม โดยการพล็อตความเครียดหลักสูงสุดลงมาถึงความเครียดหลักต่ำสุด ซึ่งหาได้จากกริดวงกลมเปลี่ยนรูปเป็นวงรีที่เกิดการคอดและการแตกหลังการยืดแบบสองแกน โดยการพล็อตเส้นโค้งรอบๆบริเวณการคอดและการกดโดยใช้การทดสอบทางเชิงกลที่แตกต่างกันอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

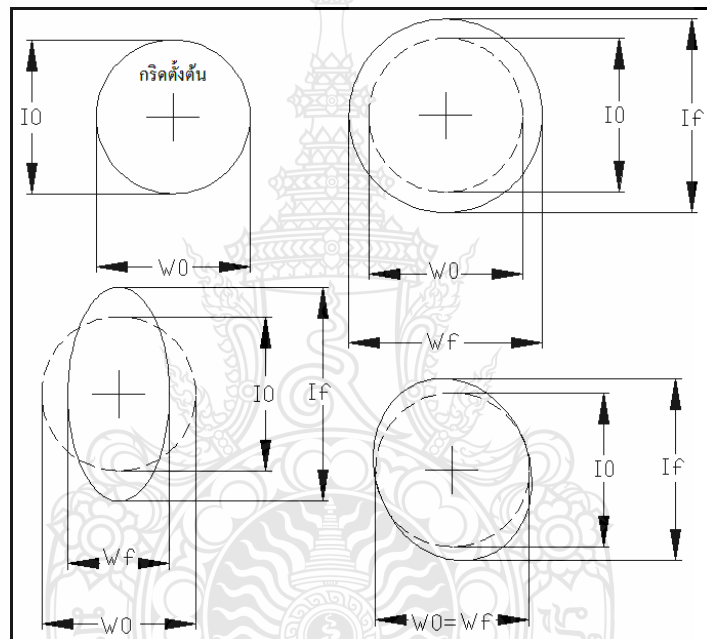
$$\% \text{ ความเครียดหลัก} = \frac{\text{ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนหลักเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$

(Major strain)

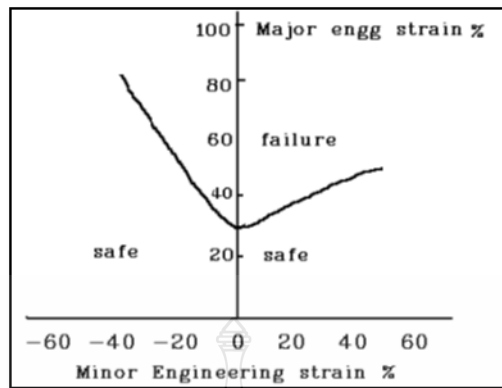
$$\% \text{ ความเครียดตรง} = \frac{(\text{ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนรองเดิม}) \times 100}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}}$$

(Major strain)

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

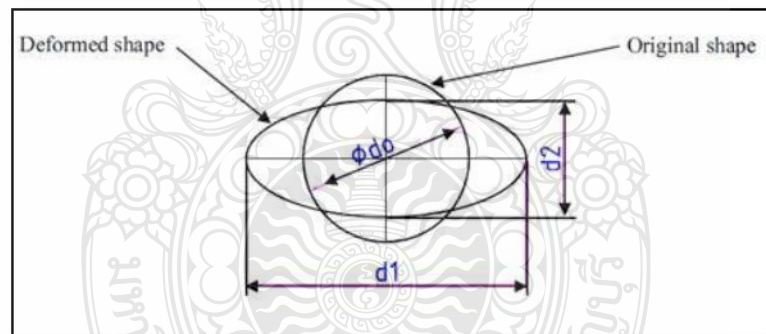


รูปที่ 2.26 การวัดอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดตรง โดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป [6]



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างแผนภาพแสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป [6]

ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆวิเคราะห์ในพื้นที่วิกฤติของชิ้นงานหลักจากทำการขึ้น ดังรูปที่ 2.28 และเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.7)



รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม

ค่าความเครียดหลัก (Major strain)

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.4)$$

ค่าความเครียดรอง (Minor strain)

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2.5)$$

ค่าความเครียดที่ความหนา (Thickness strain )

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t_2}{t_0} \quad (2.6)$$

ค่าความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain )

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (2.7)$$

### 2.2.20 อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Factor in Fluencing the FLD)

อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีเส้นโค้งเปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปได้ถูกต้องและเที่ยงตรง ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้จึงต้องระมัดระวังและปรับให้เข้าหากันกับการขึ้นรูปจริงในชิ้นส่วนอุตสาหกรรม[8]

1) ความหนาแผ่นโลหะนอกจากการใช้แผ่น โลหะคุณภาพสูงแล้ว การแก้ปัญหาอย่างง่ายที่สุดสำหรับกระบวนการขึ้นรูป โลหะแผ่นที่ไม่ประสบความสำเร็จก็คือการเพิ่มความหนาแผ่นโลหะ

2) ขนาดกริด (Grid size) กริดวงกลมเริ่มต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ความเครียดที่วัดคือค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงบนระยะทางที่เท่ากับค่า d ดังนั้นในบริเวณใกล้เคียงของความเครียดที่สะสมเพิ่มขึ้น(Strain gradient) สามารถแก้ปัญหาโดยการปรับปรุงขนาดกริดให้เล็กลงเพื่อกำหนดแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป การศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางบนค่าที่หาได้ของความเครียดหลักและความเครียดองใช้รัศมีของกริดช่วง 0.5 - 5 mm. ผลลัพธ์ยืนยันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกริดวงกลมมีอิทธิพลอย่างมากกับความเครียดที่หาได้ในทิศทางของความเครียดที่สะสมเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ความเครียดที่อยู่ข้างๆ อาจจะหาได้โดยไม่ยอมรับทั้งหมด

3) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ทั้งหมดมีผลกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสิ้น แต่สมบัติหลักๆที่สำคัญคือ ค่า n, r, m, เป็นต้น

4) ตัวแปรเสริมอื่นๆ (Other parameters) นอกจากอิทธิพลที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นยังมีอิทธิพลอื่นๆ ที่มีผลกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเช่น อุณหภูมิ การสั่นสะเทือน และอื่นๆ

### 2.2.21 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation) [9]

โครงสร้างจุลภาค หมายถึง โครงสร้างขนาดรูปร่างของเกรน (grain) และสิ่งเจือปนต่างๆ ที่กระจายผสมอยู่ในโลหะสามารถส่องขยายดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายตั้งแต่ 50 เท่าขึ้น

ไปขึ้นงานทดสอบจะถูกเตรียมด้วยการตัดด้วยแผ่นตัด โดยห้ามมิให้โดนความร้อนระหว่างการตัด มากเกินไปหรือใช้แรงกดตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเสียรูป เพื่อสะดวกในการจับขึ้น ทดสอบมาทำการขัดให้ผิวเรียบจะมีการหล่อด้วยพลาสติกให้หุ้มขึ้นทดสอบแล้วจึงนำไปขัด กระดาษทรายและสารขัดละเอียดจนให้เกิดเป็นผิวมัน จากนั้นจะมีการกัดด้วยสารเคมีทำให้เป็นรอย โครงสร้างที่ขอบเม็ดเกรนขึ้นหรือกัดให้ผิวของแต่ละผลึกให้สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องแสง ไฟฟ้าไปกระทบผิวขึ้นทดสอบและสะท้อนออกมาแตกต่างกัน การมองตรวจสอบวิธีนี้จะให้ข้อมูล เกี่ยวกับโครงสร้างของเม็ดเกรนจากขนาดรูปร่างของเม็ดเกรน เช่น เกรนหยาบหรือละเอียด การ เกิดระนาบคู่ (twin plane) รูปเข็ม รูปทรงกลมการแผ่กระจายและการเรียงตัวของเม็ดเกรน เช่น เทกซ์เจอร์ (texture) จากการรีด การแยกตัวของเม็ดเกรน

1) การหาประเภทของเม็ดเกรน โครงสร้างเม็ดเกรนจากการหล่อ การอบอ่อน ชุบ แข็ง การอบชุบ โชนคาร์บอน โชนไนไตรต์ โชนความลึกของความแข็ง การเปลี่ยนรูปและการก่อตัวใหม่ที่เม็ดเกรน เช่น ในขณะขึ้นรูปขณะเย็น และการตกผลึกใหม่ ประเภทการแยกตัวและรูปร่างการแยกตัวของโครงสร้างที่เป็นอโลหะ

2) การวิเคราะห์โครงสร้างที่แปรสภาพ เช่น โครงสร้างแนวเชื่อมที่มีโชน โครงสร้างเปลี่ยนแปลง (transition structure zone)

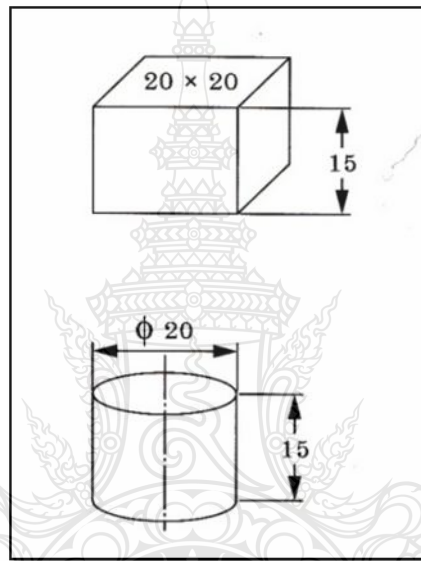
3) การวิเคราะห์ด้านหน้าของโครงสร้าง เช่น โชนแข็งที่ได้รับความร้อนมากเกินไป การแยกตัว การลดคาร์บอนบนผิวเหล็กในช่วงจุลภาค: รอยร้าวจุลภาค รู้อากาศ การฝังในของอโลหะที่ไม่พึงประสงค์ (เช่น ซี้ตะกรัน) การหาอัตราของรูพรุน (degree of porosity) ในชิ้นส่วนเล็กๆ หรือ สลับซับซ้อน

4) การวิเคราะห์การแปรสภาพของโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง ใช้หาขั้นของการขึ้นรูป (degree of forming) ในวัสดุที่ถึงสำเร็จรูปพร้อมที่ขึ้นรูปในขณะเย็นและของชิ้นส่วน ตามมาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุช่างอเมริกัน (ASTM) ที่ได้จัดแบ่งมาตรฐานกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ไว้ ดังนี้ กำลังขยาย (magnification) 50 : 1 100 : 1 200 : 1 500 : 1 1000 : 1 กำลังขยาย 50 : 1 (50 เท่าลงมา) สำหรับโครงสร้างมหภาค (macrostructure) กำลังขยาย 100 : 1 ใช้วิเคราะห์หาการฝังในของอโลหะ (เช่น การกระจาย การแยกตัวของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อเทา ริวรอยซี้ตะกรัน (slag streak) ในเหล็กกล้า สำหรับกำลังขยาย 500 : 1 และกำลังขยาย 1000 : 1 จะใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเป็นพิเศษ

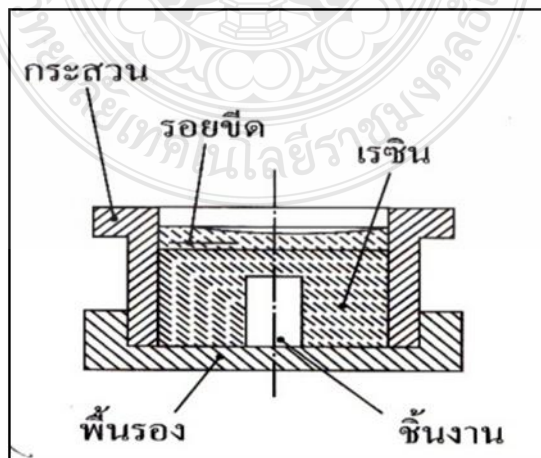
#### 2.2.22 การเตรียมขัดผิวขึ้นงานทดสอบ

การเตรียมจะกระทำโดยการตัด กรณีเป็นวัสดุแท่ง (เหล็กกล้า โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก) ด้วยการใส่แก๊สตัดหรือเลื่อยตัด หล่อเย็นด้วยน้ำหรือน้ำมันหล่อเย็น กรณีโลหะแผ่นให้ตัดขวางกับ

แนวเชื่อม กรณีเหล็กกล้าชุบแข็ง เหล็กหล่อให้ใช้แผ่นตัดทำจากคอรัันตัน ขนาดชิ้นงานมีขนาด ดังรูปที่ 2.29 สำหรับชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 mm โลหะแผ่นหนาต่ำกว่า 10 mm หรือชิ้นงานเล็กจะต้องมีการหล่อเรซินหุ้มชิ้นงานให้มีขนาดโตขึ้นพอเหมาะกับมือที่จะจับ โดยโตประมาณเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ดังรูปที่ 2.30 เรซินที่ใช้ประกอบด้วยส่วนผสม 2 ชนิด คือ เรซินและสารทำให้แข็ง (hardener) โดยนำมาผสมเข้าด้วยกัน (เรซินจะเหลวผสมสารให้แข็ง จะเป็นของเหลวหรือของแข็ง) โดยเวลาแข็งตัวจะอยู่ระหว่าง 6 ถึง 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.29 ขนาดชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค [9]



รูปที่ 2.30 การเทเรซินหุ้มชิ้นทดสอบ [9]



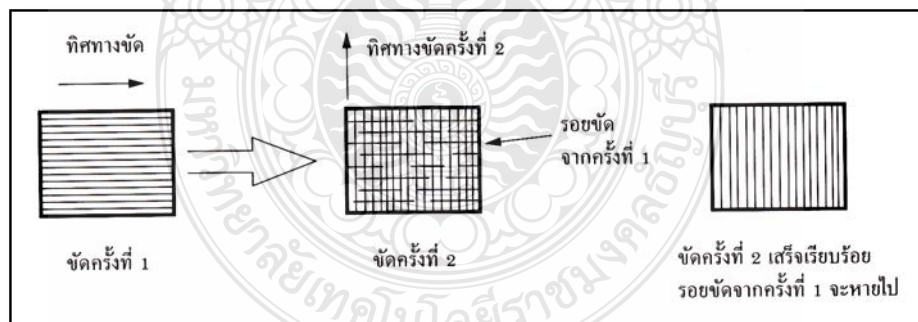
ตารางที่ 2.2 เรซินที่ใช้ในการเทหุ้มยึดขึ้นทดสอบที่สำคัญ

| ชนิดเรซิน    | การจับยึด<br>ชิ้นงาน | การหดตัว | ความแข็ง | เวลาแข็งตัว          | สีที่มองเห็น           |
|--------------|----------------------|----------|----------|----------------------|------------------------|
| อีพอกซี      | ดีมาก                | ต่ำ      | แข็งมาก  | ช้าถึงช้าปาน<br>กลาง | ใส สีเหลือง<br>ฟางข้าว |
| โพลีเอสเตอร์ | ดี                   | ปานกลาง  | ปานกลาง  | ช้าถึงช้าปาน<br>กลาง | ใสสว่าง<br>เหมือนน้ำ   |
| อะครีลิก     | ดี                   | สูง      | ปานกลาง  | ช้า                  | ไม่โปร่งแสง            |

หมายเหตุ สำหรับในห้องปฏิบัติการ จะนิยมใช้เรซินอีพอกซี

### 2.2.23 การขัดผิวละเอียด (Fine Grinding)

การขัดชิ้นงานจะใช้กระดาษทรายขัดเหล็ก (ทำด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์) เม็ดเบอร์ 220, 320, 40 และ 600 ตามลำดับ ขัดด้วยน้ำโดยในกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้ายจะต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวตลอดผิวงาน แล้วหมุนชิ้นงานไป 90 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไป ดังรูปที่ 2.31

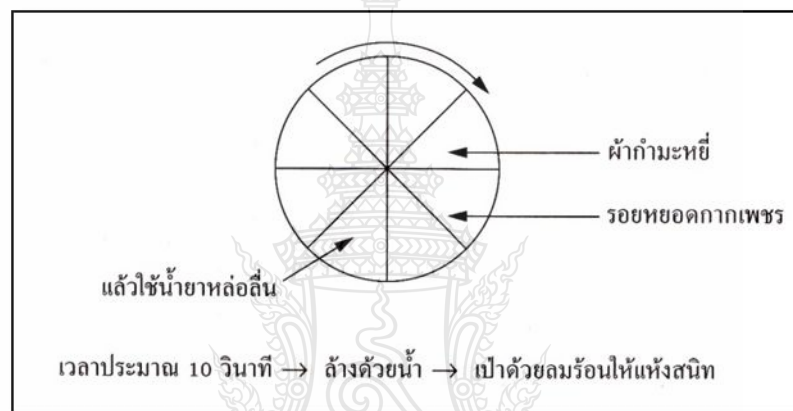


รูปที่ 2.31 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย [9]

ในการขัดจะขัดบนแท่นที่มีความเรียบ เช่น บนแผ่นกระจกหนา (หากผิวไม่เรียบจะทำให้ภาพจากการวิเคราะห์โครงสร้างผิดพลาดได้) จนปราศจากผิวรอยข่วนเล็กๆ กระดาษทรายขัดผิวและวิธีการที่กล่าวมานี้ ใช้ในการขัดผิว สำหรับโลหะเหล็ก โลหะที่มีทองแดงเป็นหลัก แมกนีเซียม แมกนีเซียมเจือ และส่วนเจือจากตะกั่ว ดีบุก และสังกะสี

#### 2.2.24 การขัดผิวมัน (Polishing)

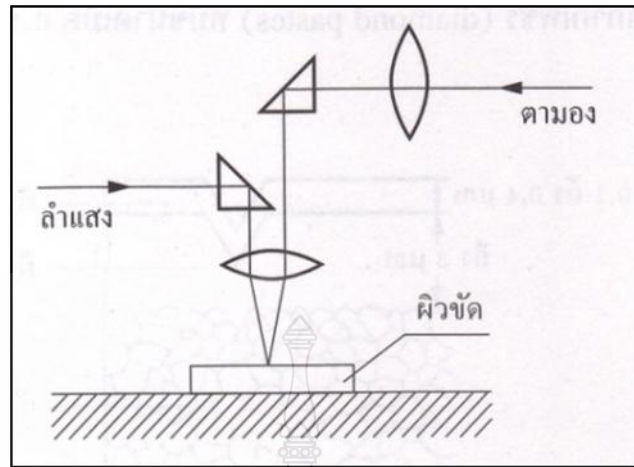
หลังจากขัดกระดาษทรายแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดบนผ้าสักหลาด เป็นงานหมุนขับด้วยมอเตอร์ (polisher) ความเร็วรอบ 300 รอบ/นาที สารที่ใช้ในการขัดประกอบด้วย น้ำยาหล่อลื่น (เป็นส่วนผสมของน้ำ 400 ซีซี น้ำมันซลูเบิล (soluble) 10 ซีซี กรณีที่เป็นเหล็กแข็งจะใช้เพสต์กากเพชร (diamond pastes) ที่มีขนาดเม็ด 0,1 ถึง 0,4  $\mu\text{m}$  หยอดลงบนงานขัดก่อน แต่โดยปกติจะนิยมใช้ผงขัดอะลูมินา (aluminium oxide) แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) โครมิกออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ หล่อลื่นด้วยน้ำ ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 2.32 การใส่สารขัดบนผ้าสักหลาด [9]

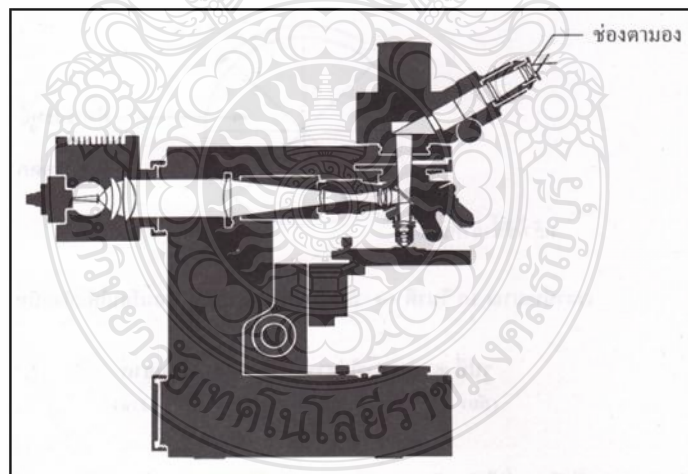
ผงอะลูมินาที่ใช้โดยทั่วไปจะมีขนาดเม็ดระหว่าง 0,3 – 1,5  $\mu\text{m}$  เป็น  $\alpha$ -อะลูมินา ใช้ขัดในตอนเริ่มต้น เมื่อจะขัดผิวเรียบสำเร็จจะใช้  $\gamma$ -อะลูมินาที่มีขนาดเล็กประมาณ 0,05  $\mu\text{m}$  การกัดผิวงานด้วยกรด (etching) หลังการขัดมันแล้วจะนำมาล้างทำความสะอาดด้วยเอทิล หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 96% แล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นจะนำชิ้นงานทดสอบมาทำการกัดผิวด้วยกรด กรดจะกัดผิวงานเป็น 2 ลักษณะ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

1) กัดกรดตำแหน่งขอบเม็ดเกรนให้เป็นร่อง (เป็นบริเวณที่เม็ดเกรนทุก 2 เม็ดมาชนกัน) ดังนั้นลำแสงที่ฉายตกกระทบในร่องจึงเกิดเป็นเงาดำ (ไม่สะท้อนกลับ) เป็นเส้นขอบเม็ดเกรนให้เห็นปรากฏในช่องตามอง ดังรูปที่ 2.33

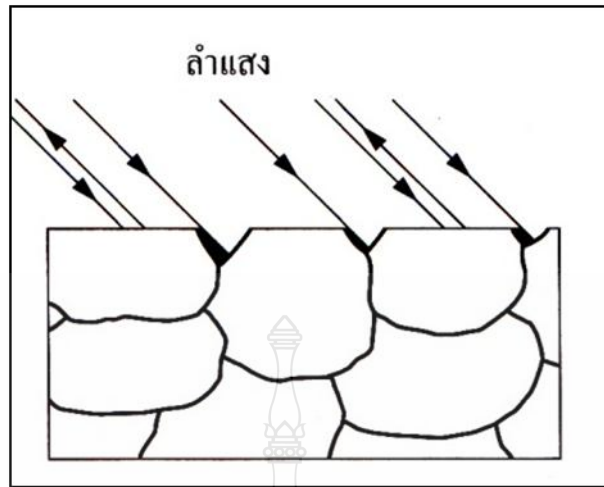


รูปที่ 2.33 หลักการฉายแสงและการมองในกล้องจุลทรรศน์ [9]

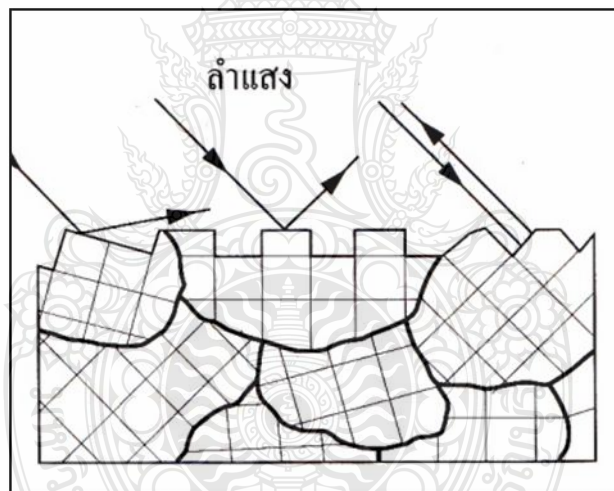
2) การกั้ดตำแหน่งผิวหน้าเม็ดเกรนทำให้เกิดสีต่างกันในเม็ดเกรน ต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากสารกั้ดผิวจะทำให้เกิดออกไซด์ชั้น และก็เป็นไปได้ที่ทุกเม็ดเกรนถูกทำให้เกิดความหยาบ ทำให้การสะท้อนของลำแสงแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.34 แสดงลำแสงที่ฉายในกล้องจุลทรรศน์ตามหลักรูปที่ [9]



รูปที่ 2.35 การกั้ดตำแหน่งขอบไม้เกรน [9]



รูปที่ 2.36 กรดกั้ดตำแหน่งผิวหน้าไม้เกรน [9]

จึงสรุปได้ว่าการใช้กรดกั้ดผิวงานจะทำให้สามารถมองเห็น โครงสร้างพื้นฐาน (matrix) ของไม้เกรนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ผิวทดสอบบางชนิด เช่น เหล็กหล่อเทาจะไม่มีกรดกั้ดกรดบนผิว เนื่องจากในบางครั้งไม่มีความจำเป็นที่จะดูโครงสร้างพื้นฐาน แต่ต้องการดูชนิดหรือรูปร่าง และขนาดของเกล็ดกราฟิตเท่านั้น

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมของกรดที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐาน ASTM [10]

| composition           |        |                     | Proceduer                    | Copper or copper alloy              |
|-----------------------|--------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| FeCl <sub>3</sub> , g | HCL,mL | H <sub>2</sub> O,mL | Immersion or swabbing ; etch | Coppers, brasses, bronzes, aluminum |
| 5                     | 50     | 100                 | lightly                      | Bronze ; darkens β                  |
| 20                    | 5      | 100                 | Or by successive             | phase in brass; gives               |
| 25                    | 25     | 100                 | light etches to              | contrast following                  |
| 1                     | 20     | 100                 | required results             | dichromate and other                |
| 8                     | 25     | 100                 |                              | etches                              |
| 5                     | 10     | 100                 |                              |                                     |

#### 2.2.25 การวัดขนาดความโตเม็ดเกรน

ขนาดความโตเม็ดเกรนมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะ เช่น ความแข็ง ความเหนียวและความต้านแรงดึงด้วยเหตุนี้ความรู้เกี่ยวกับขนาด และการกระจายของเม็ดเกรนจึงสามารถบ่งบอกคุณสมบัติของวัสดุในทางปฏิบัติได้เป็นอย่างมาก ส่วนมากแล้วจะมีการหาค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดเกรน เพื่อพัฒนาวิธีการมาตรฐานต่อไป

1) วิธีการหาขนาดความโตเม็ดเกรนแบบวงกลม ดังรูปที่ 2.37 (ก) เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ขัดผิวแล้วที่เขียนวงกลมด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  และมีพื้นที่วงกลม  $A = \pi \times D^2 / 4$  จากนั้นจะมีการนับจำนวนเม็ดเกรนเต็มรูปที่อยู่ในวงกลมและจำนวนเม็ดเกรนที่ถูกเส้นรอบวงลากผ่าน  $n_R$  คำนวณค่า  $p = 0.67$  เป็นจำนวนรวม  $Z = n + 0.67 n_R$  ที่เม็ดเกรนอยู่ในพื้นที่วงกลม ภาพที่เห็นมีกำลังขยาย  $V$  จะได้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดเม็ดเกรน ดังสมการที่ 2.8

$$\bar{A} = \frac{A \times 10^6}{V^2 \times Z} = \frac{A \times 10^6}{V^2 (0.67n_R + n)} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.8)$$

เมื่อ  $A$  มีหน่วย  $\text{mm}^2$  ค่าเฉลี่ยของความโตเม็ดเกรน คือ  $d$  คำนวณจาก

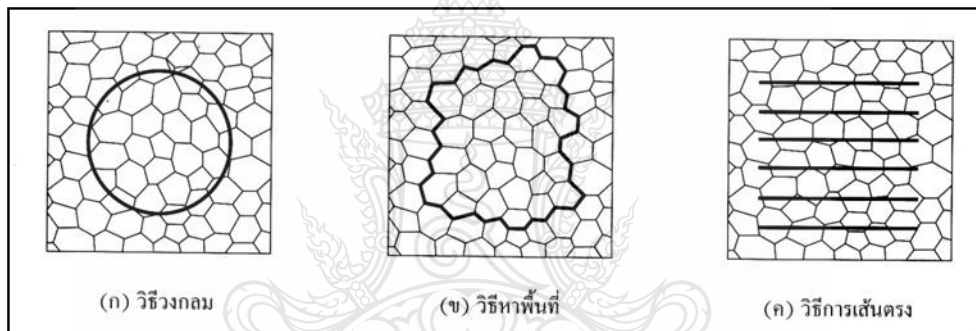
$$d = \sqrt{\bar{A}} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.9)$$

2) วิธีการหาขนาดความโตเม็ดเกรนแบบหาพื้นที่ ดังรูปที่ 2.37 (ข) จะมีการขีดเส้นตามแนวช่วงของเม็ดเกรนที่มีมุมเป็นเหลี่ยมเกือบเป็นมุมฉาก และขนาดพื้นที่ A จะหาด้วยวิธีการระนาบเลขาคณิต (plane geometry) จากจำนวนของเม็ดเกรนที่ถูกขีดด้วย n จะสามารถคำนวณพื้นที่เฉลี่ยของเม็ดเกรน  $\bar{A}$  ได้ ดังสมการที่ 2.10

$$\bar{A} = A \times 10^6 / n \cdot V \quad (2.10)$$

n = จำนวนของเม็ดเกรน

V = กำลังขยาย (เท่า)



รูปที่ 2.37 การหาขนาดความโตเม็ดเกรน [9]

จากสมการที่ (2.10) สามารถนำไปแทนใน (2.9) เพื่อหาขนาดความโตเม็ดเกรนได้

3) วิธีการหาขนาดความโตเม็ดเกรน จากรูปที่ 2.37(ค) จะมีการขีดเส้นตรงความยาว L (mm) ตามจำนวนเม็ดเกรน Z ต่อตารางนิ้ว จำนวนของเม็ดเกรนที่ถูกเส้นตรงตัดผ่าน  $n_K$  และกำลังขยาย V จะได้สมการความโตเม็ดเกรน ดังสมการที่ 2.11

$$d = L \times Z \times 10^3 / (n_K - 1) V \quad [\mu\text{m}] \quad (2.11)$$

L = ความยาวของขีดเส้นตรง

Z = จำนวนเม็ดเกรน ต่อตารางนิ้ว

V = กำลังขยาย (เท่า)

โดยปกติจะใช้วิธีลากเส้นตรง 5 ถึง 10 วิธีเส้นตรงที่ลากผ่านเม็ดเกรนส่วนใหญ่จะไม่ตัดผ่านส่วนที่ยาวที่สุดของเม็ดเกรน ด้วยเหตุนี้ค่าเฉลี่ยที่ได้จะเล็กกว่าความเป็นจริง สมาคมทดสอบวัสดุช่างอเมริกัน (ASTM) ได้พัฒนาวิธีการพิเศษที่ใช้ในการหาขนาดความโตเม็ดเกรนโดยใช้จำนวน Z ต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100 เท่า เป็นพื้นฐานในการจัดแบ่งขนาดความโตของเม็ดเกรน โดยเบอร์เกรด N = ขนาดความโตเม็ดเกรน (ASTM) จะได้ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13

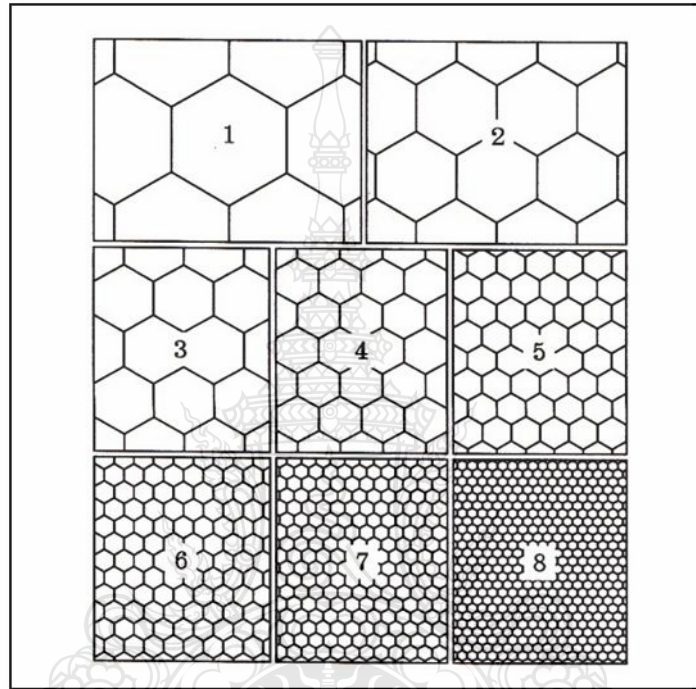
$$Z = 2^{n-1} \quad (2.12)$$

$$N = (\lg Z / \lg 2) + 1 \quad (2.13)$$

ตารางที่ 2.4 การกำหนดขนาดความโตของเม็ดเกรนตาม ASTM และจำนวนเม็ดเกรนต่อ  $\text{mm}^2$

| ขนาดความโตของเม็ดเกรน<br>ตาม ASTM Type | จำนวนเม็ดเกรน<br>ต่อ ตร.นิ้ว<br>ขยาย 100 เท่า Z | จำนวนเม็ดเกรน<br>(บนผิวขัดจริง)<br>ต่อ $\text{mm}^2$ |
|--|---|--|
| เม็ดเกรนหยาบ                           | -1  | 4  |
|  | 0   | 8  |
|  | 1   | 16   |
|  | 2   | 32   |
|  | 3   | 64   |
|  | 4   | 428  |
| เม็ดเกรนละเอียด                        | 5   | 256  |
|  | 6   | 512  |
|  | 7   | 1024   |
|  | 8   | 2048   |
|  | 9   | 4096   |
|  | 10  | 8192   |
|  | 11  | 16384  |
|  | 12  | 32768  |

จากตารางที่ 2.3 จะรวมขนาดเบอร์ความโตของเม็ดเกรนและจำนวนเม็ดเกรนต่อตารางนิ้วและตารางมิลลิเมตร  $\text{mm}^2$  เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.38 จะแสดงขนาดความโตของเม็ดเกรนตามเบอร์ต่าง ๆ ด้วยการเปรียบเทียบกับกำลังขยาย 100 เท่าของชิ้นงานที่ขัดผิว [9]



รูปที่ 2.38 การหาขนาดความโตเม็ดเกรนตามเบอร์ของ ASTM [9]

ขนาดของเม็ดเกรนที่มองเห็นจากการขัดผิวมันจะขึ้นอยู่กับ การเลือกของพื้นที่ตัดมาทำการขัดผิวของวัสดุแล้วแต่ตำแหน่งของเม็ดเกรนที่อ้างอิงพื้นที่ที่ถูกตัดในการส่องกล้องขยายดู โครงสร้างที่จะสามารถเปรียบเทียบได้ตามรูปมาตรฐาน ดังรูปที่ 2.38

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ และยังมีปัจจัยต่างๆ ในการทำงานที่จะต้องศึกษา เพื่อให้เกิดกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพและเป็นระเบียบแบบแผนในการทำงาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะศึกษากลไกการ



ทำงานของกระบวนการ โดยมีงานวรรณกรรมที่น่าสนใจในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ดังนี้

P.A.F.Martin , N.Bay , M Skjoedt , M.B Silva [11] ได้ทำการศึกษาทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์รูปแบบ การขึ้นรูปขึ้นพื้นฐานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และอธิบายผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยที่ในเวลา สองถึงสามปีที่ผ่านมา โดยใช้พื้นฐานรูปแบบในการวิเคราะห์ แบบ membrane โดยมีแรงเสียดทานในหลายแนวแกนในแนวระนาบ

Kathryn Jackson ,Julian Allwood [12] ได้ทำการศึกษา ลักษณะของกลศาสตร์ในการขึ้นรูปของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด และนำผลต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบกัน

F.Micari , G.Ambrogio , L.Filice [13] ได้ทำการศึกษาลักษณะของ ความเที่ยงตรงของรูปร่างและขนาดในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยพบว่า ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับสัดส่วนความหนาของวัสดุ ที่แปรผันกัน มีผลต่อ ความเที่ยงตรงของรูปร่างและขนาดที่ได้ทำการขึ้นรูป

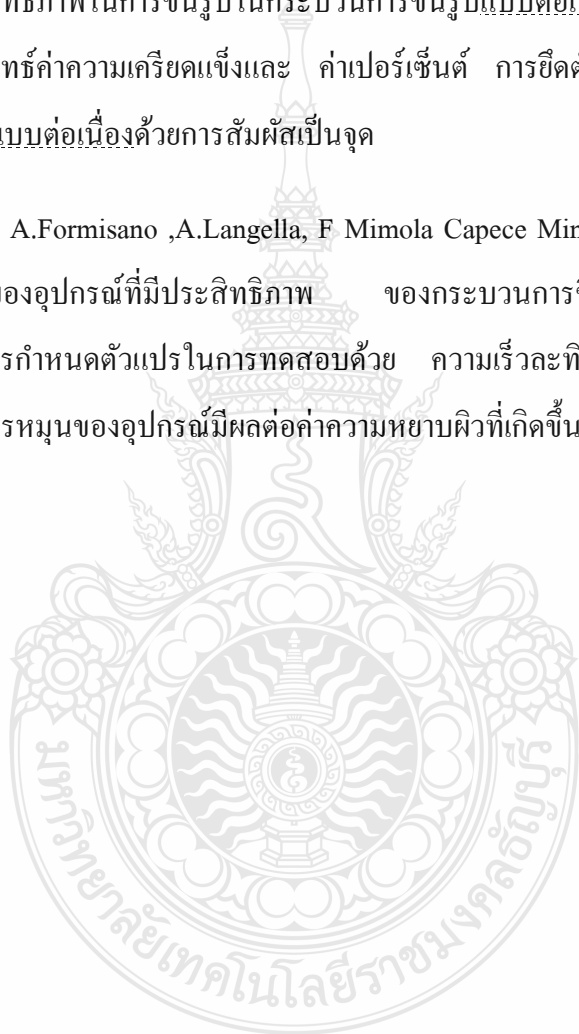
Joost Duflou, Yasemin Tunckol ,Alex Szekeres, Paul Vanherck [14] ได้ทำการทดลองศึกษา การวัดแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยปัจจัยในลักษณะต่างๆเช่นระยะการกดในแนวแกน Z,ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ,ความหนาของวัสดุ, มุมในการขึ้นรูป,รูปทรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและสารหล่อลื่นประเภทต่างๆ

J.Kopac , Z.Kampus [15] ได้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องกัด CNC ในกระบวนการขึ้นรูป และควบคุมเส้นการเดินทางของอุปกรณ์ที่ใช้การขึ้นรูปโดยระบบ Computer aids Manufacturing พบว่า อุปกรณ์จับยึดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ควรเปลี่ยนไปโดยมีความสัมพันธ์กันกับรูปร่างพื้นฐานที่ทำการออกแบบไว้และ แสดงถึงความสัมพันธ์ของมุมในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความลึกของ ชิ้นงาน อีกด้วย

J. Jeswiet [16] ได้ทำการศึกษาวิธีการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และได้นำระบบ คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต มาช่วยในกระบวนการทำงาน ทำให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

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

M. Durante, A. Formisano, A. Langella, F. Mimola Capece Minutolo [17] ได้ทำการศึกษาถึงทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพ ของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดด้วยการกำหนดตัวแปรในการทดสอบด้วย ความเร็วละทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ พบว่าความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์มีผลต่อค่าความหยابผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะแผ่น



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการขึ้นรูป รวมไปถึงผลกระทบต่อโครงสร้างในโลหะแผ่นทองเหลือง โดยจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยหลักที่ผลต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น คือมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์และวิเคราะห์ผลในรูปของ ความหนาที่เปลี่ยนแปลงจากระบวนการขึ้นรูป และขนาดของเกรนเฉลี่ยหลังจากกระบวนการขึ้นรูป และวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษางานวิจัยและทำการทดลองพบว่า กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยในการขึ้นรูปมาก แต่พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูป ได้แก่พารามิเตอร์ของ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์ เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะทำการศึกษา ความเที่ยงตรงของชิ้นงานที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป รวมไปถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็น แผ่นทองเหลือง ที่มีส่วนผสม Cu เท่ากับ 61.34 เปอร์เซ็นต์ และ Zn เท่ากับ 38.4 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 0.6 มิลลิเมตรและ วัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูปจะเป็น โลหะสำหรับใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11

##### 3.2.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นงานทดสอบแผ่นโลหะทองเหลือง โดยทำการตัดให้มีขนาดความกว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หนา 0.6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานแผ่นทองเหลือง

โดยวัสดุทองเหลืองแผ่นที่นำมาใช้เป็นวัสดุในการทดลองจะมีค่าส่วนผสมองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

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                            |

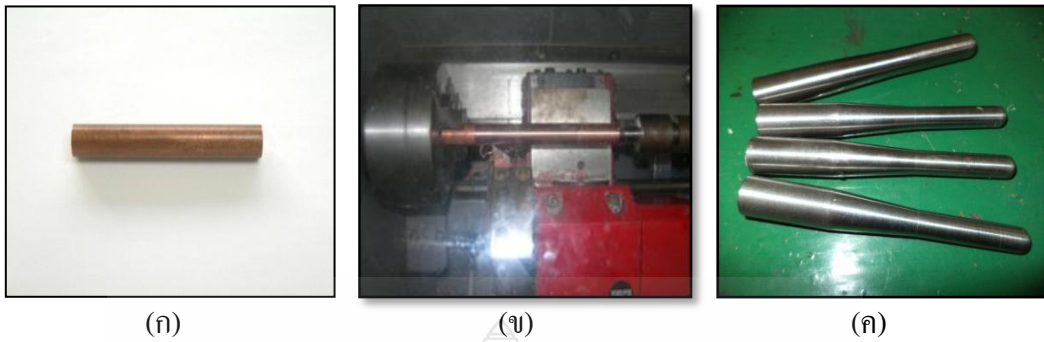
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดลอง

| 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 ก)

### 3.2.2 เตรียมวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

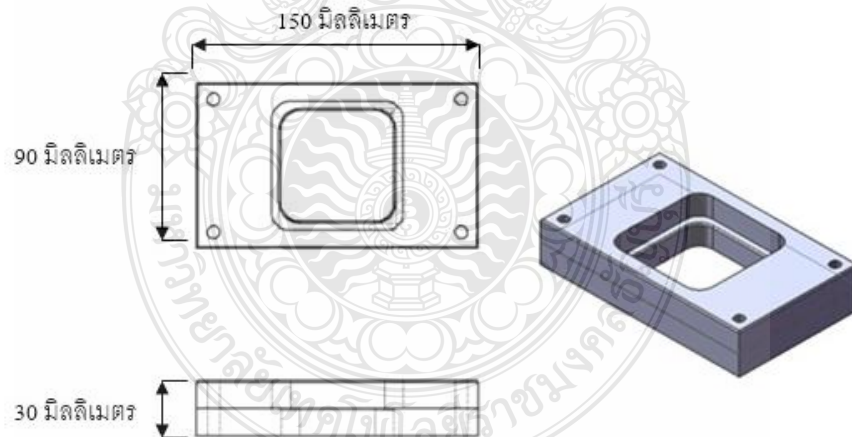
เตรียมวัสดุโลหะเหล็กกล้าเครื่องมือ ตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร โดยที่ปลายมีรูปร่างครึ่งวงกลม รัศมี 10 มิลลิเมตร [2] ด้วยเครื่องกลึง CNC Turning เพื่อให้อุปกรณ์มีขนาดของรัศมีเท่ากันทั้งหมด ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการกดขึ้นรูป (ก) แท่งเหล็ก เกรด SKD 11 สำหรับทำ (ข) กลึง ปอกและปาดหน้าด้วย CNC Turning (ค) แท่งอุปกรณ์ที่ใช้กดขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการกลึง

### 3.2.3 สร้างอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ

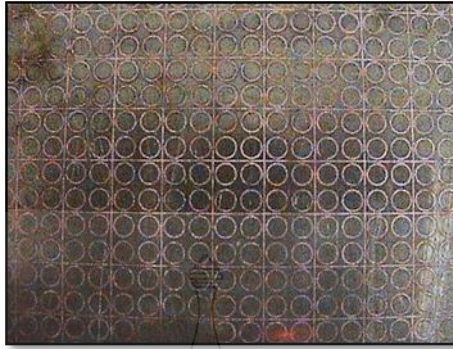
อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้โลหะ เหล็กมาตรฐาน JIS เกรด S50C โดยใช้เครื่องจักร CNC ในการสร้าง ให้มีขนาดกว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร [2] ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่นโลหะ

### 3.2.4 เตรียมวัสดุโลหะแผ่นทองเหลืองตีกริดวงกลมโดยใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า

กระบวนการตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้าเป็นการชุบเคลือบผิววัสดุทำให้เกิดลายตาราง เพื่อทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังจากที่ขึ้นงานหลังการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผ่นทองเหลืองที่ผ่านการ ตีกรีดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า

โดยการสร้างกรีดวงกลมขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้ามี กระบวนการดังต่อไปนี้คือ

- 1) นำภาคเหล็กมารองขึ้นทดสอบวางบนโต๊ะปฏิบัติงาน
- 2) ประกอบตัวปรับแรงดันและแปลงไฟโดยให้กำหนดให้สายดินหนีบกับแผ่นเหล็กที่ ใช้รองและ อีกสายหนึ่งติดลูกกลิ้ง
- 3) นำแผ่น โลหะทองเหลืองที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบวางบนแผ่นเหล็กรองอีกทีหนึ่งโดย แผ่นชิ้นงานจะต้องผ่านการแต่งครีบและขอบ พร้อมกับล้างคราบไขมันให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้ง และระวังอย่าให้มีเศษ โลหะหรือวัสดุใดๆ เพราะจะทำให้ แผ่นตีลายกรีดวงกลม (Stencils) เกิดทะลุ เนื่องจากการอาร์คของเศษโลหะกับลูกกลิ้งกดขณะขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า
- 4) นำแผ่นตีลายกรีดวงกลม (Stencils) วางบนชิ้นงานโดยจัดให้ตรงกับแนวชิ้นงาน
- 5) นำแผ่นผ้าบางรองที่ฉีดหรือหยดด้วยน้ำยา อิเล็กโทรไลต์ หนาๆ วางบนแผ่นตีลาย กรีดวงกลม (Stencils) ในบริเวณที่จะตีกรีด แล้วจัดแผ่นตีลายกรีดวงกลม (Stencils) ให้ตั้งอย่าให้ ขยับเพื่อป้องกันการเลื่อน
- 6) เปิดสวิตซ์ที่เครื่องปรับไฟ ปรับตั้งขนาดไฟฟ้าให้เหมาะสม ใช้ลูกกลิ้งกดลงบน แผ่นผ้าบางรองกดพอประมาณและกลิ้งเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆ เพียงครั้งเดียวซึ่งสังเกตโดยให้เข็มวัด กระแสไฟฟ้ากระดิกมาที่กึ่งกลางหรือสูงๆของมาตรวัด จะทำให้ กรีดวงกลมบนแผ่นโลหะมีความ ชัดเจนและเส้นมีความคมสวยงาม หลังจากนั้นจึงปิดสวิตซ์ไฟแล้วนำแผ่นผ้ารองและStencils ออก เพื่อดูว่า กรีดวงกลมมีความชัดเจนหรือไม่ ซึ่งมีอุปสรรคในการทำงาน ดังรูปที่ 3.5



(ก)

(ข)

(ค)

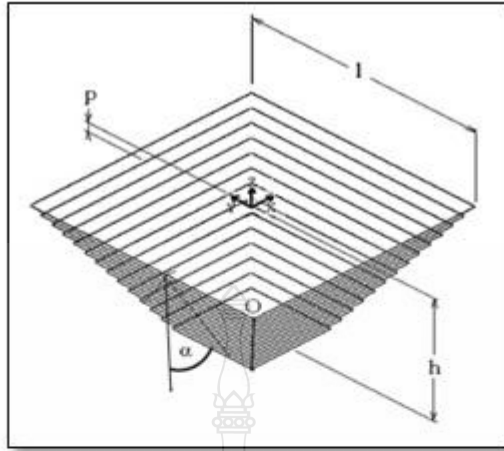
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์การกัดกรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า (ก) แผ่น stencil ขนาด 10 x 12 นิ้ว (ข) เครื่องกัดกรดไฟฟ้าที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน (ค) ลักษณะขึ้นลายกริดวงกลมโดยใช้ลูกกลิ้งกด

7) หลังจากตีกริดวงกลมเสร็จแล้วให้นำแผ่นทดสอบมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาดและเช็ดให้แห้งแล้วพ่นน้ำยากัดสนิม เพื่อรอการขึ้นรูปต่อไป

### 3.2.6 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบนี้ จะใช้การขึ้นรูปทรง ที่ง่ายต่อการขึ้นรูป โดยในการทดสอบจะทำการขึ้นรูปโดยมีรูปทรงแบบ พีรามิดหัวตัด โดยฐาน ของพีรามิดเป็น สีเหลี่ยมด้านเท่าขนาด 58 x 58 มม. โดยในการทดลองจะมีกำหนดเส้นทางการเดินขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรมช่วยในการผลิต (CAM) ทำการกำหนดเส้นทางการทำงานที่เกิดขึ้น และมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป (Angle forming), ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (Speed ) ความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (Feed ) ดังรูปที่ 3.6 [2]





| 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)   | 200,400,600  |

รูปที่ 3.6 แสดงมุม, เส้นทางการเดิน และ ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยในการทดลอง จะกำหนดให้มีการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดในการทำงานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

| ความเร็วในการเคลื่อนที่<br>มิลลิเมตรต่อนาที | มุม 30 องศา                         |                                     |                                     |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|   | ความเร็วในการหมุน<br>200 รอบต่อนาที | ความเร็วในการหมุน<br>400 รอบต่อนาที | ความเร็วในการหมุน<br>600 รอบต่อนาที |
| 100   | X                                   | Y                                   | Z                                   |
| 200   | X                                   | Y                                   | Z                                   |

|     |   |   |   |
|-----|---|---|---|
| 300 | X | Y | Z |
|-----|---|---|---|

ตารางที่ 3.4 ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

| ความเร็วในการเคลื่อนที่<br>มิลลิเมตรต่อนาที | มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป 40 องศา       |                                     |                                     |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|   | ความเร็วในการหมุน<br>200 รอบต่อนาที | ความเร็วในการหมุน<br>400 รอบต่อนาที | ความเร็วในการหมุน<br>600 รอบต่อนาที |
| 100   | X                                   | Y                                   | Z                                   |
| 200   | X                                   | Y                                   | Z                                   |
| 300   | X                                   | Y                                   | Z                                   |

ตารางที่ 3.5 ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

| ความเร็วในการเคลื่อนที่<br>มิลลิเมตรต่อนาที | มุม 50 องศา                         |                                     |                                     |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|   | ความเร็วในการหมุน<br>200 รอบต่อนาที | ความเร็วในการหมุน<br>400 รอบต่อนาที | ความเร็วในการหมุน<br>600 รอบต่อนาที |
| 100   | X                                   | Y                                   | Z                                   |
| 200   | X                                   | Y                                   | Z                                   |
| 300   | X                                   | Y                                   | Z                                   |

### 3.2.7 วิธีการทดลองและบันทึกข้อมูล

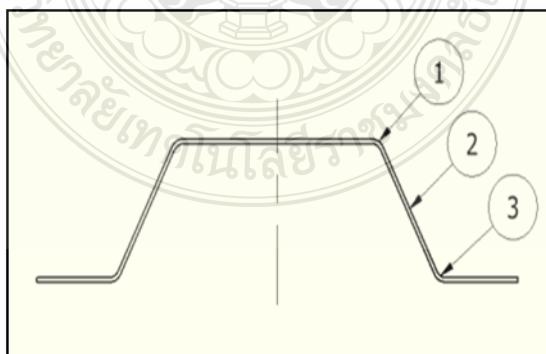
การทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดแผ่น โลหะ โดยระบบจับยึดแผ่น โลหะจะมีการกำหนด พื้นที่ช่องว่างเพื่อให้แผ่นโลหะเปลี่ยนไปตามรูปแบบที่กำหนด หลังจากทำการทดลองเสร็จแล้วจะต้องบันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน รุ่น ARROW 500

### 3.2.8 วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน

การวัดค่าเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานตามแนวแกน X และแนวแกน Y จะกระทำโดยการวิเคราะห์กริดวงกลมที่ทำการกัดกรดเกลือไว้ที่ระยะห่างอย่างสม่ำเสมอ มีขนาดวงกลมเท่ากันขนาดผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร โดยหลังการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นทองเหลือง จะเปลี่ยนรูปเป็นวงรี วัดขนาดของวงรีเพื่อกำหนดขนาดโตสุด(ความเครียดหลัก)และขนาดต่ำสุด(ความเครียดรอง) ความเครียดทั้งสองนี้จะถูกพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 บริเวณทำการวัดความเครียดชิ้นงานทั้งหมด

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

1) ใช้กล้อง ถ่ายภาพระยะใกล้ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการถ่ายภาพขนาดวงกริดมาตรฐานก่อนทำการขึ้นรูป ที่ระยะโฟกัสเดียวกันกับชิ้นงานทดลอง เพื่อทำการกำหนดให้เป็นขนาดโดยใช้โปรแกรม Dino capture 2.0 สำหรับใช้ในการวัดขนาดวงกลมกริดที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.9 ดังรูปที่ 3.10



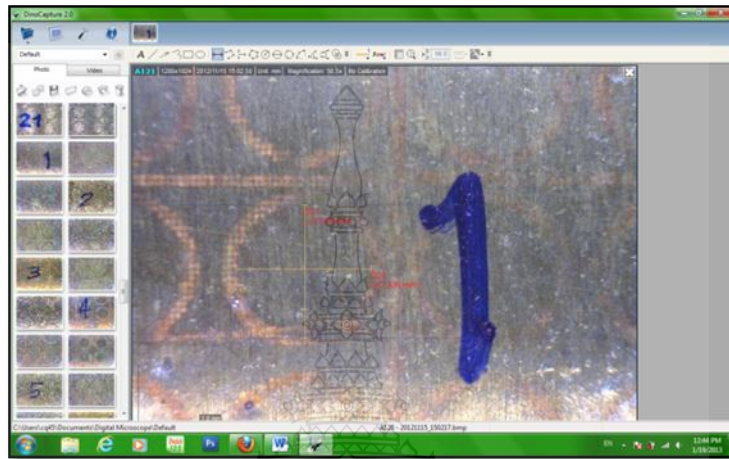
รูปที่ 3.9 กล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง



รูปที่ 3.10 โปรแกรมสำหรับการวัดขนาด

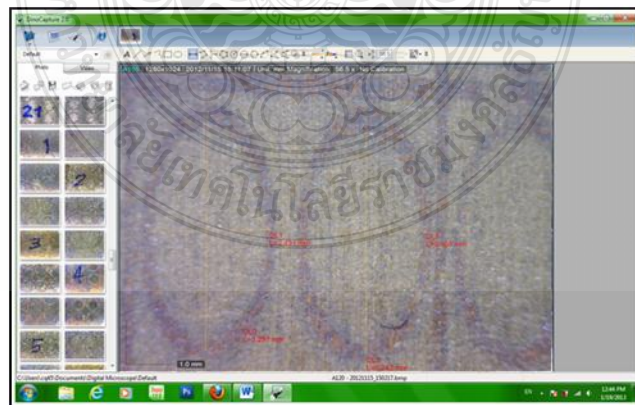
2) ทำการ calibrate โดยการปรับสเกลให้ตรงตามสเกลมาตรฐานในโปรแกรมก่อนทำการวัด

3) เลือกชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปใช้กล้องที่มีความละเอียดสูง ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัส โดยให้ขณะที่ถ่ายภาพ พื้นผิวของแผ่นทองเหลืองจะทำการถ่ายภาพ โดยให้ระยะโฟกัสที่ทำการถ่ายภาพกริด นั้นจะต้องทำกันในทุกชิ้นงานทดลอง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.11 รูปการกำหนดขนาดอ้างอิงของกริดมาตรฐาน

4) เลือกกริดวงกลมที่เกิดการเปลี่ยนขนาดของวงกลมกริด เป็นวงรีในแต่ละชิ้นการทดลองแล้ว นำมาสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนในระยะโฟกัสเดียวกัน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปการสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน

5) จากการวัดขนาดกริดด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Dino capture 2.0 วัดขนาดกริดในแนวตั้งและแนวนอนแล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและเปอร์เซ็นต์ของความเครียดรอง

อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\% \text{ ความเครียดหลัก} = \frac{\text{ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนหลักเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$

(Major strain)

ความยาวแกนหลักเดิม

$$\% \text{ ความเครียดรอง} = \frac{\text{ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนรองเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$

(Major strain)

ความยาวแกนหลักเดิม

โดย

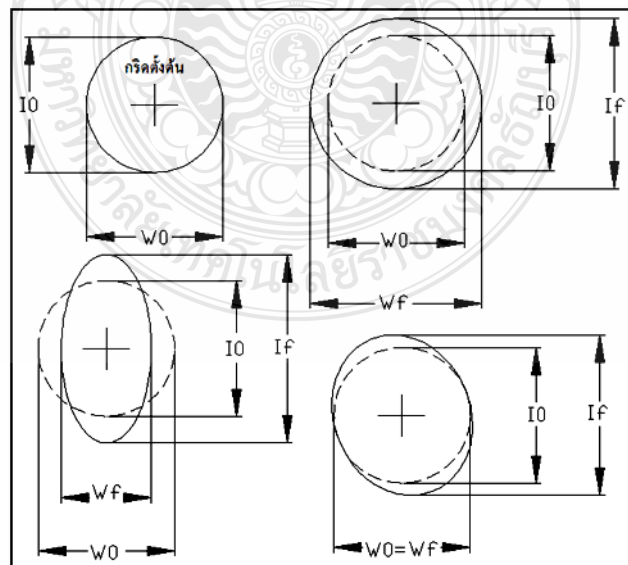
$I_0$  = ความยาวแกนหลักเดิม

$I_f$  = ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป

$W_0$  = ความยาวแกนหลักเดิม

$W_f$  = ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป

โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลมดังรูปที่ 3.13



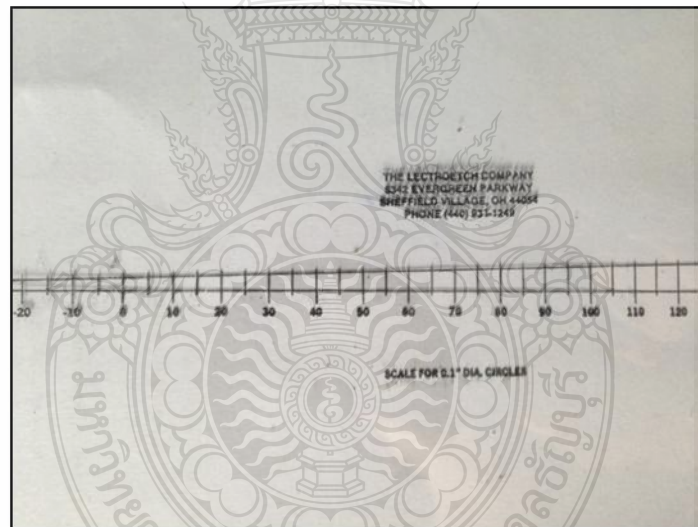
รูปที่ 3.13 การวัดอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดและอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดรอง

6) นำความเครียดหลัก (Major strain) และความเครียดรอง (Minor strain) มาพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel

7) ปรับปรุงและแก้ไขผลการวิจัยหรือข้อบกพร่องต่างๆ

8) สรุปผลการวิจัยและนำเสนอผลงาน

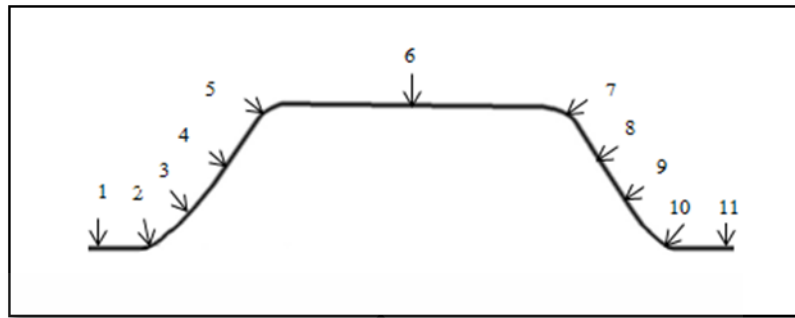
การวัดค่าเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานบริเวณที่เป็นส่วนโค้งของชิ้นงานจะกระทำโดยการวิเคราะห์กริดวงกลม โดยการใช้แผ่นไมล่า(Myla tape or Strain Tape) วัดความกว้างของความเครียดหลักและความเครียดรองซึ่งบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าที่ไม่ละเอียดมากเนื่องจากสเกลมีระยะห่างของความเครียดต่างกันเท่ากับ 5 % ความผิดพลาดจะมีค่อนข้างสูงเพราะกริดมีขนาดเล็ก ควรจะใช้แว่นขยายหรือกล้อง Microscope ในการวัดทำให้ความผิดพลาดน้อยลง [8] ดังรูปที่ 3.14



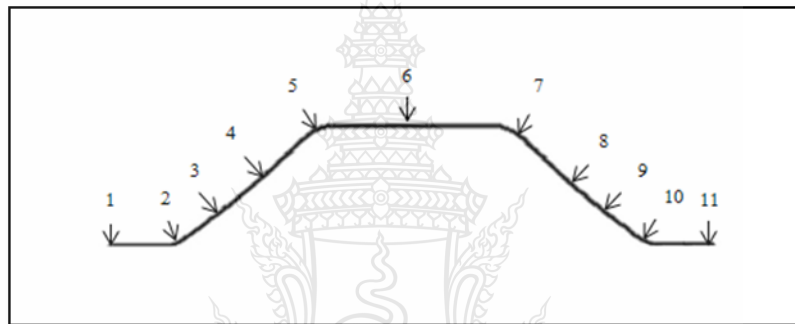
รูปที่ 3.14 แผ่นไมล่า(Myla tape or Strain Tape) วัดความเครียด

### 3.2.9 วัดความหนาของผนังชิ้นงาน

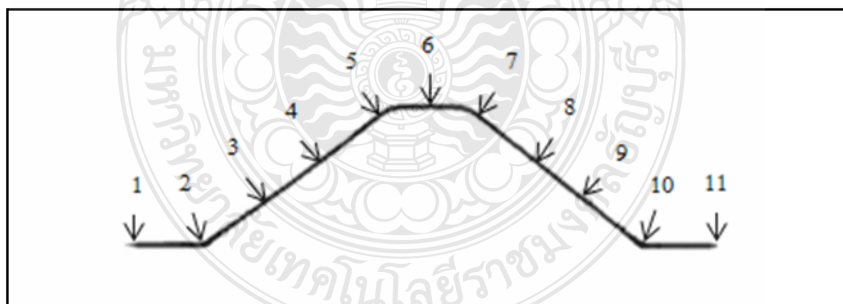
การวัดความหนาที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 30,40 และ 50 องศา ด้วยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed) และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกัน โดยจะทำการวัดความหนาในตำแหน่งที่ผ่านการขึ้นรูปตามจุดที่กำหนด ดังรูปที่ 3.15, 3.16 และ 3.17



รูปที่ 3.15 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา



รูปที่ 3.16 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา



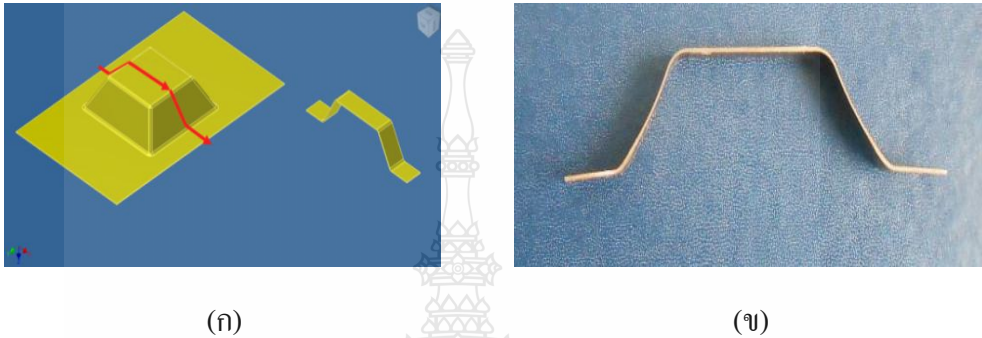
รูปที่ 3.17 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

### 3.2.10 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป

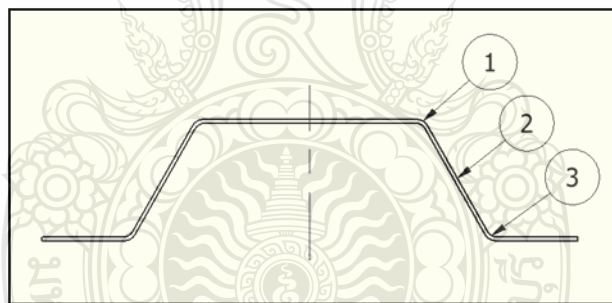
การศึกษาโครงสร้างของโลหะแผ่นทองเหลืองในระดับ จุลภาค โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนจากการไหลตัว และการกระจายตัวของเม็ดเกรนที่มีผลจากการขึ้นรูป โดยการตัดผ่าชิ้นงานเพื่อศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างในชิ้นงาน และทำการวัดขนาดเกรนเฉลี่ยในแต่ละจุด



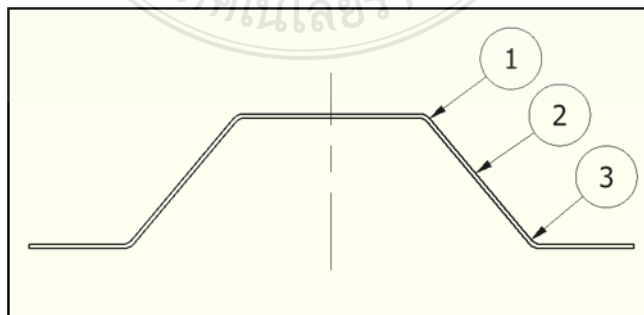
ที่ผ่านการขึ้นรูป วัดขนาดเกรนโดยใช้ Image Analysis ตามมาตรฐาน ASTM E1382 - 97(2004) โดยต้องผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานก่อน รวมถึงการกัดกรด และถ่ายรูปด้วยกล้อง Inverted Microscope (Zeiss : Axiovert 200MAT) ที่กำลังขยาย 200X หรือ 500X [10] โดยวิเคราะห์ตาม ตำแหน่งที่ผ่านการขึ้นรูปที่กำหนด ดังรูปที่ 3.18 – 3.21



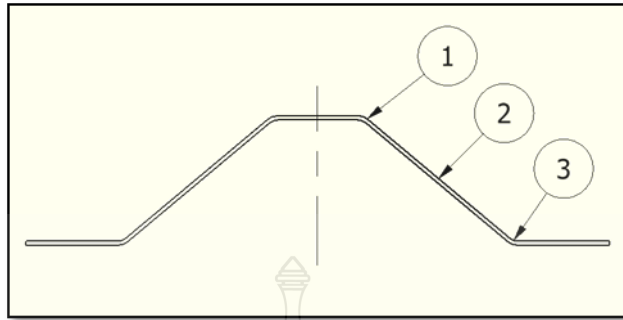
รูปที่ 3.18 กระบวนการตัดผ่าชิ้นงาน (ก) ลักษณะการตัดชิ้นงาน (ข) ชิ้นงานที่ตัดแล้ว



รูปที่ 3.19 รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา



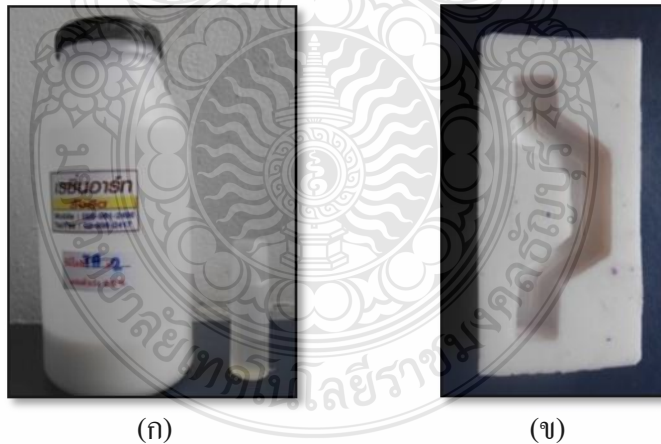
รูปที่ 3.20 รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา



รูปที่ 3.21 รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นโลหะทองเหลืองเพื่อหาขนาดความโตของเม็ดเกรน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโดยการหล่อซิลิโคน เพื่อใช้ในการทำแม่แบบในการหล่อเรซินหุ้มชิ้นงานเพื่อเตรียมการขัด โดยมีส่วนผสม คือ ซิลิโคน TA#2 และตัวเร่งผสมเพื่อทำให้ซิลิโคนแข็งตัวเร็วขึ้น แล้วปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 3.22

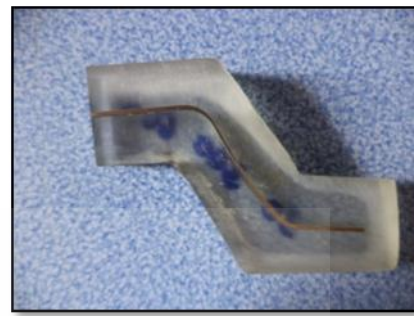


รูปที่ 3.22 กระบวนการเตรียมชิ้นงานหล่อซิลิโคน (ก) ซิลิโคน TA#2 และตัวเร่ง (ข) แบบซิลิโคน

2) ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการหล่อเรซินหุ้มชิ้นงาน โดยให้มีขนาดโตมากพอที่จะใช้มือจับในการขัดชิ้นงาน โดยมีส่วนประกอบเป็นเรซินและตัวเร่งทำให้แข็งตัวเร็วขึ้นผสมกันโดยปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 3.23



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.23 กระบวนการเตรียมชิ้นงานหล่อเรซิน (ก) เรซิน No.024 (ข) ตัวอย่างชิ้นงานหล่อ

3) ทำการขัดละเอียด (fine grinding) โดยใช้เครื่องขัด PRESTI รุ่น MECAPOL P 320 ที่ใช้กระดาษทรายขัดโลหะขัดกับน้ำ โดยขัดในทิศทางเดียวและหมุนชิ้นงาน 90 องศาเพื่อขัดแนวเดิมให้หายไป ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เครื่องขัดที่ใช้ในการขัดผิว

4) ทำการขัดผิวมัน (polishing) โดยนำชิ้นงานทดสอบมาขัดผ้าสักหลาด บนจานหมุน โดยใช้ อะลูมิน่ากับน้ำหรือผงกากเพชรในการขัด

5) ทำการกัดกรด หลังจากการขัดมันเสร็จ โดยใช้  $H_2O + HCL + FeCl_2$  เพื่อทำการดูโครงสร้าง และใช้ กรดตัวเดิมที่เข้มข้นกว่าในการกัดผิวเพื่อวัดขนาด โดยทำการใช้ส้อมจุ่มแช่ ดังรูปที่ 3.25



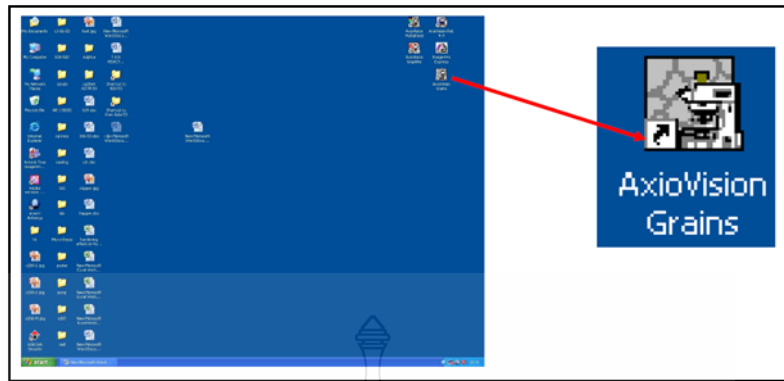
รูปที่ 3.25 รูปกรด  $H_2O + HCL + FeCl_2$

6) ใช้กล้อง Microscope : ZEISS รุ่น AXIOVERT 200M MAT ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ ช่วยในการถ่ายภาพ ทำการถ่ายภาพโครงสร้างเพื่อเตรียมการวัดขนาดเม็ดเกรนของทองเหลืองก่อนทำการขึ้นรูป เพื่อทำการกำหนดให้เป็นภาพอ้างอิงในโปรแกรม สำหรับใช้ในการวัดขนาดของเม็ดเกรนที่เปลี่ยนไป ที่กำลังขยาย 200X และ 500X ดังรูปที่ 3.26



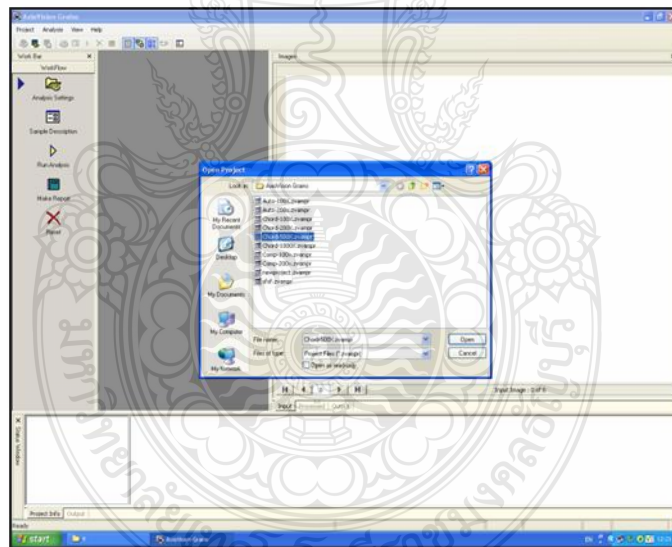
รูปที่ 3.26 กล้อง Microscope ZEISS รุ่น AXIOVERT 200M MAT

7) ทำการหาขนาดความโตของเม็ดเกรน ด้วยใช้โปรแกรม Axio Vision Grains มาตรฐาน ASTM E1382-97(2004) [10] โดยใช้ภาพจากคอมพิวเตอร์ ที่กำลังขยายแล้วแต่ความเหมาะสมของขนาดเกรนที่กำลังขยาย 200X หรือ 500 X ใช้จำนวน 5 รูป ดังรูปที่ 3.27



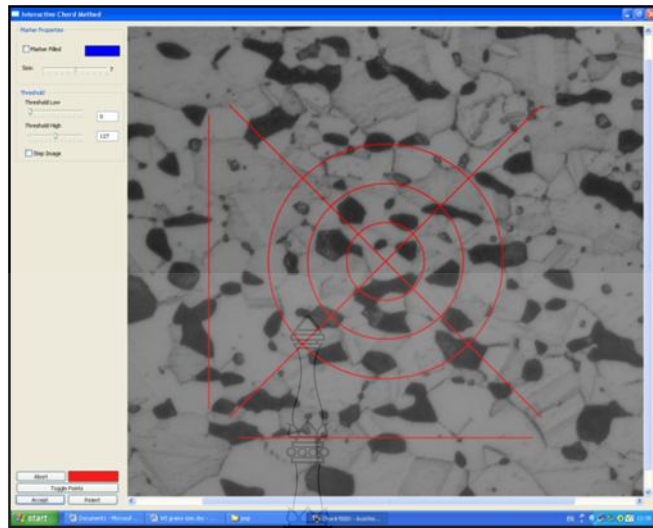
รูปที่ 3.27 ภาพโปรแกรมที่ใช้วัดขนาดเกรน

8) เข้าโหมด open project เพื่อเลือกโปรแกรมในการวัดขนาด จะใช้โปรแกรม chord - 50X.zvampr สำหรับรูปถ่ายกำลังขยาย 500 เท่า ดังรูปที่ 3.28



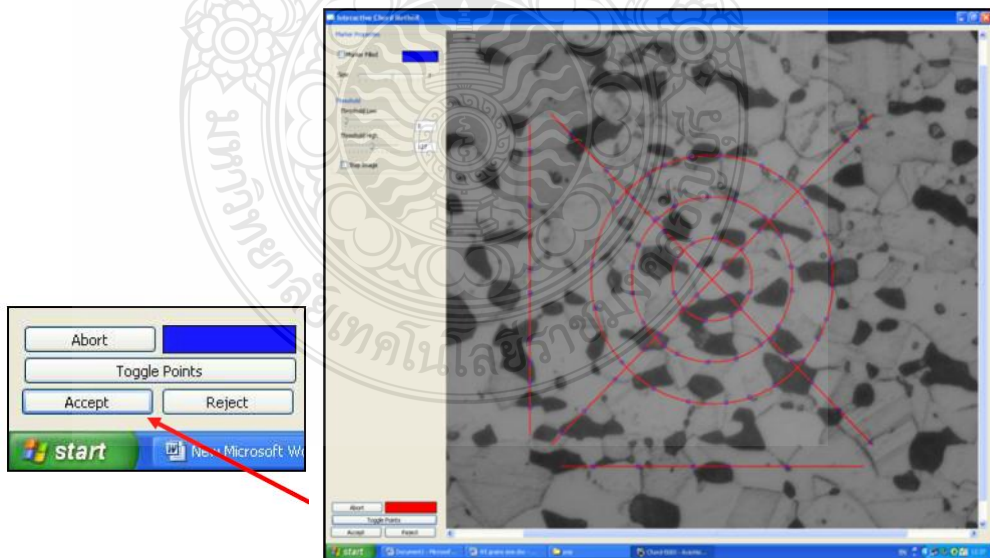
รูปที่ 3.28 รูปการเลือกใช้โปรแกรมวัดขนาด

9) ทำการเลือกรูปขนาด 500X จากเพิ่มข้อมูลที่บันทึกไว้ ดังรูปที่ 3.29



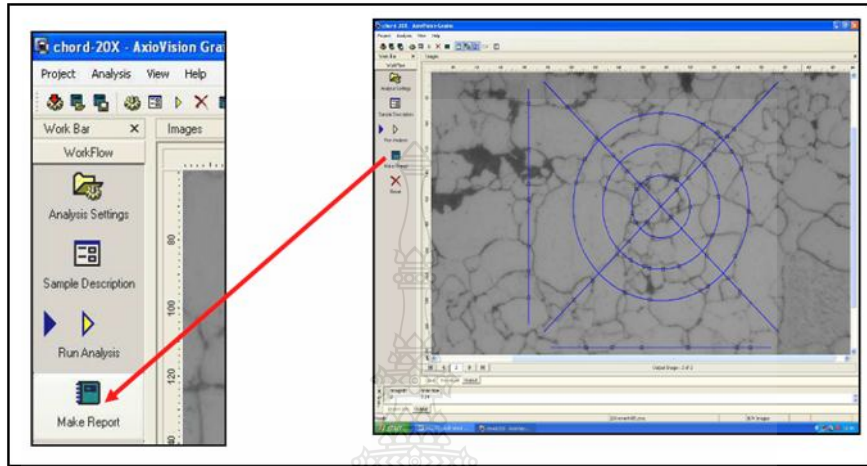
รูปที่ 3.29 รูปการเลือกภาพถ่ายเพื่อวัดขนาด

10) ทำการ Mark เลือกจุด โดยคลิกซ้ายตรงจุดตัดระหว่างขอบเกรนกับเส้นที่กำหนด โดยกดทุกเส้นที่ตัดผ่านจนครบทั้ง 5 รูป เมื่อครบจึงกด Accept เพื่อประมวลผล โดยโปรแกรมจะทำการหาขนาดเฉลี่ยออกมา ดังรูปที่ 3.30

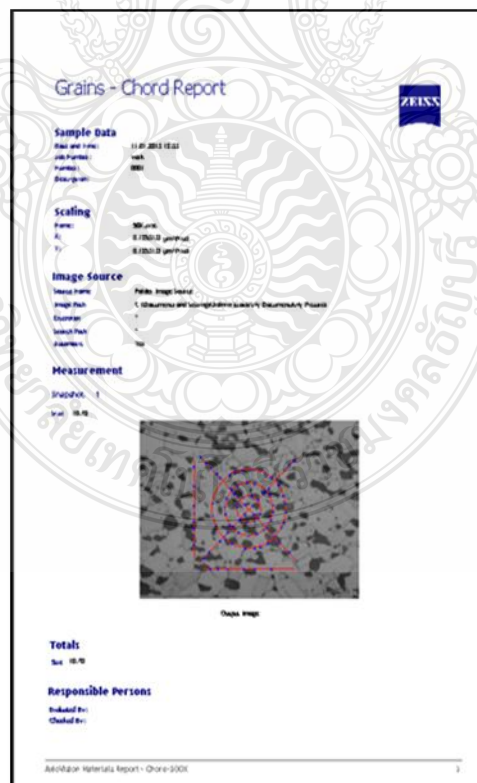


รูปที่ 3.30 รูปการเลือกจุดตัดที่ขอบเกรนเพื่อวัดขนาด

11) เข้าโหมด Make Report ทำ Report และทำการบันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 3.31 และ ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.31 รูปการทำ Report และบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.32 รูปแบบฟอร์มข้อมูล

## บทที่ 4

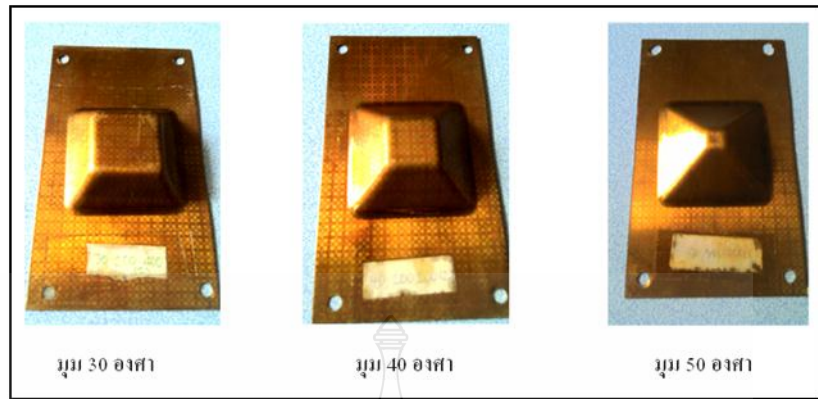
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองการศึกษาถึงปัจจัยที่ผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งประกอบวัสดุโลหะตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ในการกดขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด บนวัสดุชิ้นงานทองเหลือง โดยใช้ปัจจัยในการทำงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ปัจจัยของ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ โดยจะทำการศึกษาความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการขึ้นรูป ศึกษาผลกระทบจากปัจจัย ในรูปของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงภายในชิ้นงาน โดยการวัดขนาดเกรน ผลการทดลองที่แสดงในบทนี้จะเป็นผลการทดลองที่ได้ทำการคำนวณและวัดค่าจากการทดลอง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ผลกระทบในการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งแบ่งผลการทดลองตามตัวแปรและขนาดของมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป

#### 4.1 ผลการทดลอง

การทดลองปรับค่าปัจจัยขนาดของมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 4.1 เป็นการทดสอบ เพื่อศึกษาการทำงาน และผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยควบคุมปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา 40 องศา 50 องศา ความเร็วในการหมุนของ อุปกรณ์ที่ใช้ในกดการขึ้นรูป 200 รอบ ต่อนาที 400 รอบ ต่อนาที 600 รอบ ต่อนาที อัตราการเคลื่อนที่ของ อุปกรณ์ที่ใช้ในกดการขึ้นรูป 100 มิลลิเมตรต่อนาที 200 มิลลิเมตรต่อนาที 400 มิลลิเมตรต่อนาที โดยจากการทดลองทำให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีส่งผลกระทบต่อค่าต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำงานซึ่ง จะอยู่ในรูปของ การศึกษาความหนา และความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน





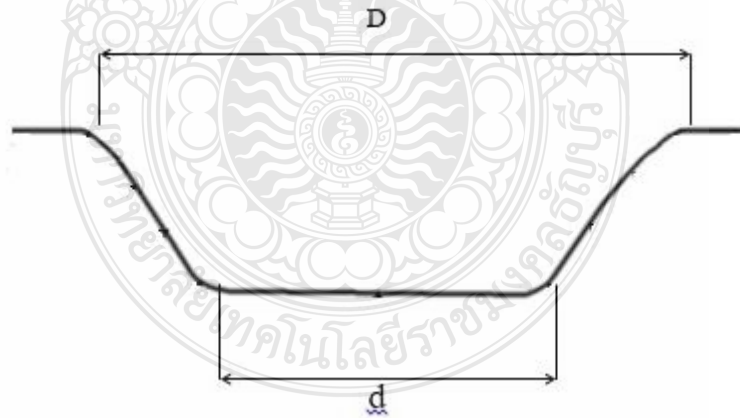
รูปที่ 4.1 รูปลักษณะการขึ้นรูปเพื่อความเครียดผิวที่ มุม 30,40 และ 50 องศา

#### 4.1.1 เปอร์เซ็นต์การลดรูป

โดยเปอร์เซ็นต์การลดรูปสามารถคำนวณได้ ดังรูปที่ 4.2

โดย  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนตากขึ้นรูป

$d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ตากขึ้นรูปแล้ว



รูปที่ 4.2 รูปลักษณะของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนตากขึ้นรูป และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ตากขึ้นรูปแล้ว

โดย  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนตากขึ้นรูป

$d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ตากขึ้นรูปแล้ว

$$\% \text{ Reduction} = \frac{D-d}{D} \times 100 \quad (4.1)$$

จากสูตร เราสามารถหาเปอร์เซ็นต์การลดรูปในแต่ละมุมที่ทำการขึ้นรูปได้ดังสมการที่ 4.1 โดย  $D = 58$  มิลลิเมตร

มุม 30 องศา  $d = 34.90$  มิลลิเมตร

มุม 40 องศา  $d = 24.43$  มิลลิเมตร

มุม 50 องศา  $d = 10.33$  มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา} \quad \% \text{ Reduction} &= \frac{58-34.90}{58} \times 100 \\ \% \text{ Reduction} &= 39.82 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา} \quad \% \text{ Reduction} &= \frac{58-24.43}{58} \times 100 \\ \% \text{ Reduction} &= 57.86 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา} \quad \% \text{ Reduction} &= \frac{58-10.33}{58} \times 100 \\ \% \text{ Reduction} &= 82.18 \% \end{aligned}$$

จากการคำนวณ พบว่า เปอร์เซ็นต์การลดรูปในที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ที่มุมต่างๆในการขึ้นรูปคือ

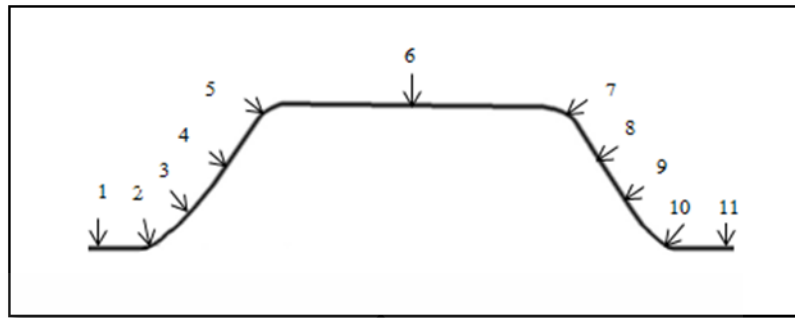
การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา เปอร์เซ็นต์การลดรูป = 39.82 %

การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา เปอร์เซ็นต์การลดรูป = 57.86 %

การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา เปอร์เซ็นต์การลดรูป = 82.18 %

#### 4.1.2 ผลการวัดความหนาของผนังชิ้นงานที่เปลี่ยนไปหลังการขึ้นรูป

1) จากการทดลองขึ้นรูป แผ่นทองเหลืองให้มีลักษณะเป็นรูปปริมาตรหัวตัว ตามมุมที่กำหนด คือ มุม 30 องศา และทำการวัดความหนา ตามภาคตัดขวาง ตามจุดที่กำหนด ดังรูปที่ 4.3



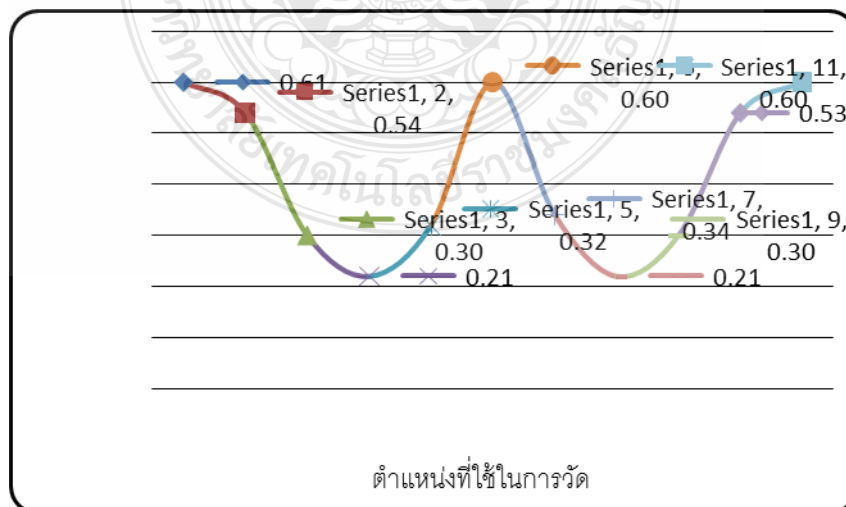
รูปที่ 4.3 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

| จุดที่                   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความหนา<br>( มิลลิเมตร ) | 0.61 | 0.54 | 0.30 | 0.21 | 0.32 | 0.60 | 0.34 | 0.21 | 0.30 | 0.53 | 0.60 |

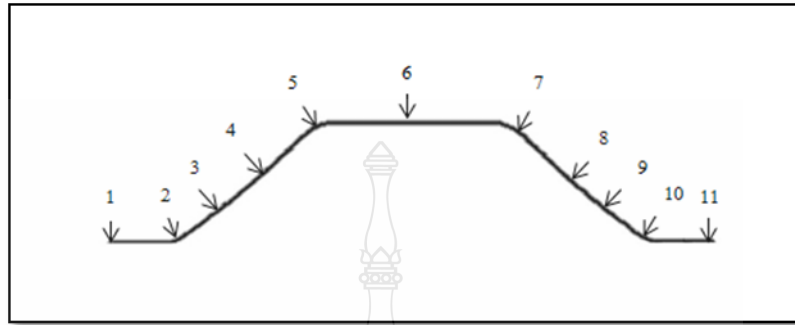
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.1 (ภาคผนวก ฉ)

จากการทดลองวัดความหนาสามารถนำข้อมูลที่ได้อาจการวัดมาสร้างกราฟแสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในการขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

2) จากการทดลองขึ้นรูป แผ่นทองเหลืองให้มีลักษณะเป็นรูปปิรามิดหัวตัว ตามมุมที่กำหนด คือ มุม 40 องศา และทำการวัดความหนา ตามภาคตัดขวาง ตามจุดที่กำหนด ดังรูปที่ 4.5



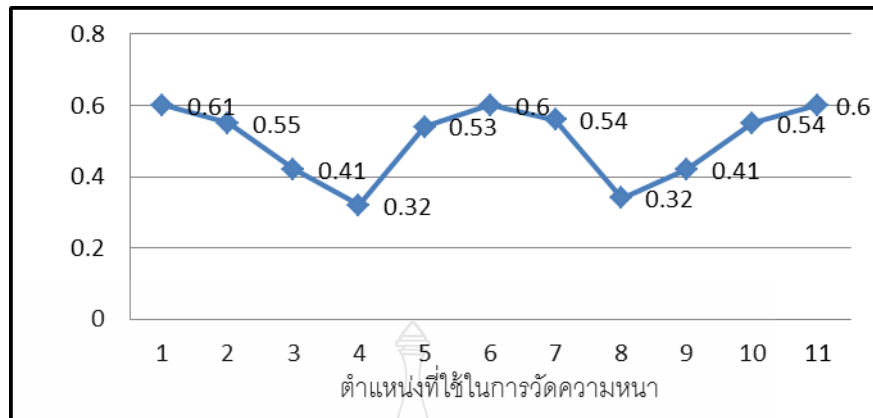
รูปที่ 4.5 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

| จุดที่                 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความหนา<br>(มิลลิเมตร) | 0.61 | 0.55 | 0.41 | 0.32 | 0.53 | 0.60 | 0.54 | 0.32 | 0.41 | 0.54 | 0.60 |

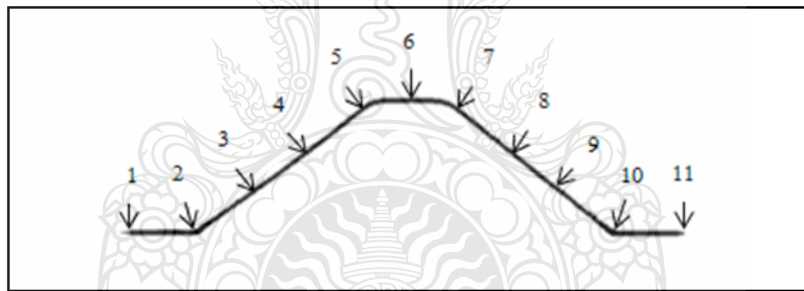
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.2 (ภาคผนวก ก)

จากการทดลองวัดความหนาสามารถนำข้อมูลที่ได้อาจการวัดมาสร้างกราฟแสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในการขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

3) จากการทดลองขึ้นรูป แผ่นทองเหลืองให้มีลักษณะเป็นรูปปิรามิดหัวตัว ตามมุมที่กำหนด คือ มุม 50 องศาและทำการวัดความหนา ตามภาคตัดขวาง ตามจุดที่กำหนด ดังรูปที่ 4.7



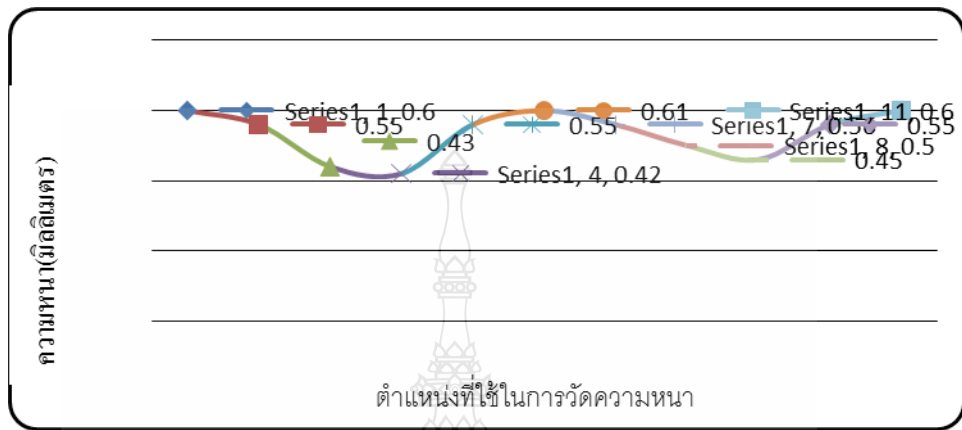
รูปที่ 4.7 รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

| จุดที่              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความหนา (มิลลิเมตร) | 0.60 | 0.55 | 0.43 | 0.42 | 0.55 | 0.61 | 0.56 | 0.50 | 0.45 | 0.55 | 0.60 |

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.3 (ภาคผนวก ๓)

จากการทดลองวัดความหนาสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาสร้างกราฟแสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในการขึ้นรูปได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

#### 4.1.3 ผลการทดลองความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ในการทดลองจะทำการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยการใช้แผ่นไมล่า (Mylar tape or Strain Tape) วัดความเครียดผิวโค้งรวมถึงผิวเรียบ จุดที่ 2 ดังรูปที่ 4.8 เพื่อทดลองเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง ของการวัดค่าความเครียด ด้วยแผ่นไมล่า และการใช้โปรแกรม

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไมล่าที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก % )

| ปัจจัยการทำงาน<br>ความเร็วเดิน/<br>ความเร็วรอบ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา |          |          |
|--|-----------------------------|----------|----------|
|  | อัตราความเครียดหลัก %       |          |          |
|  | จุดที่ 1                    | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |
| 100/200  | 56.67%                      | 100%     | -1.67%   |
| 200/200  | 46.67%                      | 103.33%  | -1.67%   |
| 300/200  | 50%                         | 106.67%  | 0%       |
| 100/400  | 58.33%                      | 105%     | -1.67%   |

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %) (ต่อ)

| ปัจจัยการทำงาน<br>ความเร็วเดิน/<br>ความเร็วรอบ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา |          |          |
|--|-----------------------------|----------|----------|
|  | อัตราความเครียดหลัก %       |          |          |
|  | จุดที่ 1                    | จุดที่ 2 | จุดที่ 1 |
| 200/400  | 60%                         | 105%     | -1.67%   |
| 300/400  | 56.67%                      | 108.33%  | -1.67%   |
| 100/600  | 48.33%                      | 111.67%  | 0%       |
| 200/600  | 58.33%                      | 110%     | 0%       |
| 300/600  | 53.33%                      | 108.33%  | -1.67%   |

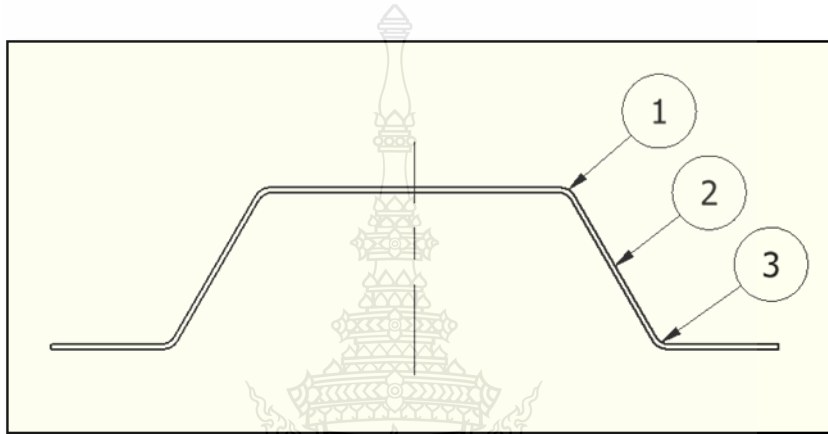
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.4 (ภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

| ความเร็ว<br>ในการเคลื่อนที่ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา      |                                |                               |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                             | อัตราความเครียดหลัก % (จุดที่ 2) |                                |                               |
|                             | ความเร็วรอบ 200 รอบ<br>ต่อนาที   | ความเร็วรอบ 400 รอบ<br>ต่อนาที | ความเร็วรอบ 600รอบ<br>ต่อนาที |
| 100 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที    | 111.59%                          | 106.57%                        | 116.29%                       |
| 200 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที    | 110.69%                          | 111.26%                        | 115.09%                       |
| 300 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที    | 112.26%                          | 118.49%                        | 113.65%                       |

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.5 (ภาคผนวก จ)

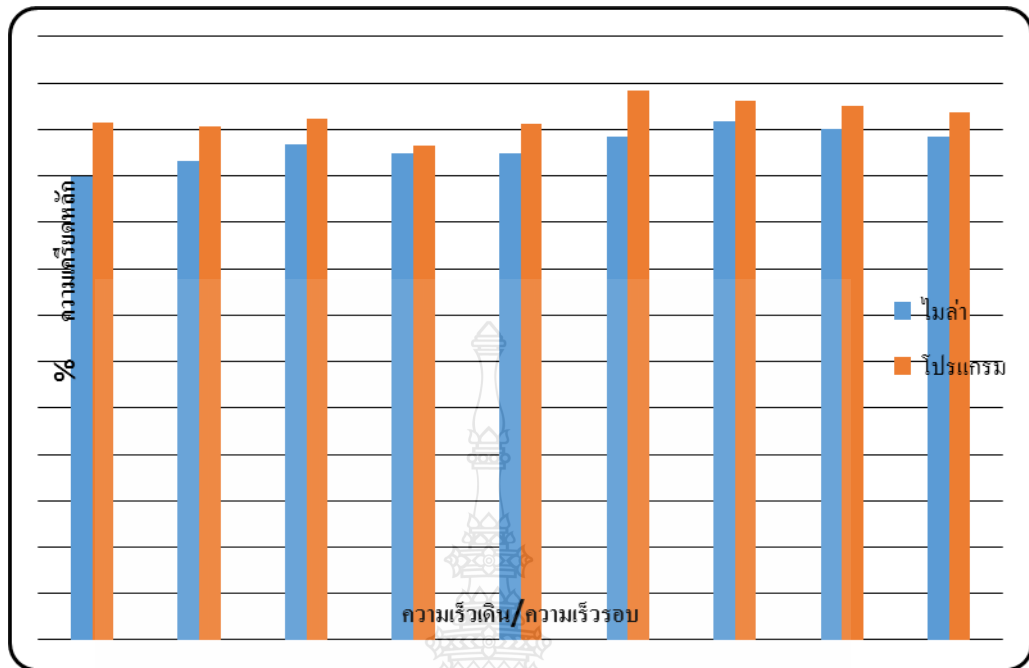
โดยในการขึ้นรูปที่ มุม 30 องศา ลักษณะของวงกลมกริดที่เปลี่ยนไปที่เกิดจากการขึ้นรูปจะมีลักษณะยืดออกไปอย่างมาก จากการถูกขึ้นรูปในแนวแกน ทำให้เราสามารถคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้น ที่จากความยาวที่เปลี่ยนไปจากการยืดที่ผิวชิ้นงาน เมื่อเทียบกับกับยาวเดิม โดยจะทำการทดลอง 3 จุดหลัก ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.9 รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

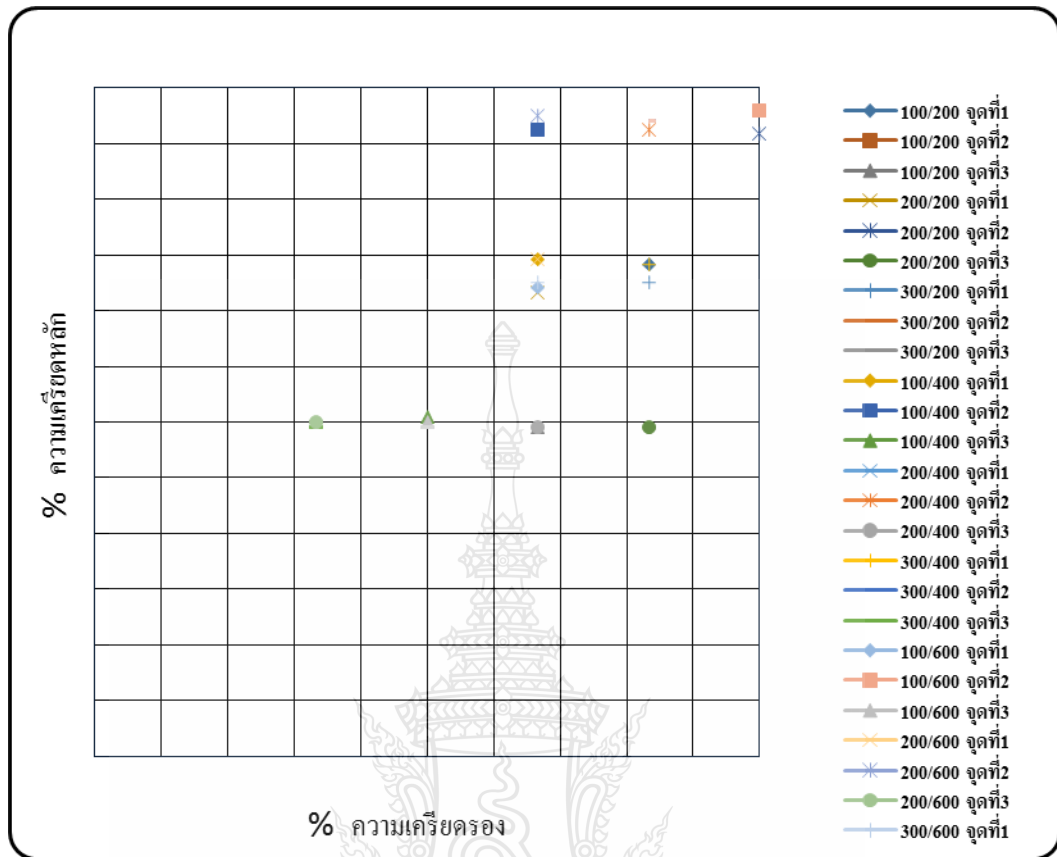
จากผลการทดลองวัดค่าความเครียดที่จุดยืดออกสูงสุด (จุดที่ 2) ที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา ด้วยตัวแปรที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรมเปรียบเทียบกับแผ่นไม่ว่าพบว่า % ความเครียดหลักที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ 5-11% ดังรูปที่ 4.10





รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่นไม่ล่า และ โปรแกรมที่มุม 30 องศา (จุดที่ 2)

จากผลการทดลองพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากระบบขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed)และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed)ที่แตกต่างกัน พบว่า อัตราความเครียดหลักค่าสูงสุดที่เกิดขึ้น เกิดจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วเดินในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที คือ 106.57 % และพบว่า อัตราความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปรความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาทีคือ 118.49 % ในการวัดด้วยโปรแกรม ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

| ปัจจัยการทำงาน<br>ความเร็วเดิน/<br>ความเร็วรอบ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา |          |          |
|--|-----------------------------|----------|----------|
|  | อัตราความเครียดหลัก %       |          |          |
|  | จุดที่ 1                    | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |
| 100/200  | 33.33%                      | 50%      | 1.67%    |
| 200/200  | 50%                         | 58.33%   | 0%       |
| 300/200  | 46.67%                      | 56.67%   | -1.67%   |
| 100/400  | 43.33%                      | 51.67%   | 0%       |

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไม  
 ล่าที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก % ) (ต่อ)

| ปัจจัยการทำงาน<br>ความเร็วเดิน/<br>ความเร็วรอบ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา |          |          |
|--|-----------------------------|----------|----------|
|  | อัตราความเครียดหลัก %       |          |          |
|  | จุดที่ 1                    | จุดที่ 2 | จุดที่ 1 |
| 200/400  | 41.67%                      | 53.33%   | 0%       |
| 300/400  | 38.33%                      | 55%      | 1.67%    |
| 100/600  | 36.67%                      | 51.67%   | -3.33%   |
| 200/600  | 41.67%                      | 51.67%   | -3.33%   |
| 300/600  | 46.67%                      | 53.33%   | -1.67%   |

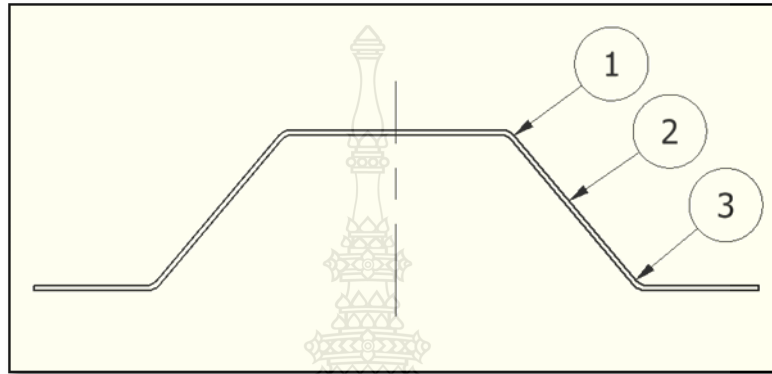
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.6 (ภาคผนวก ๓)

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้  
 โปรแกรมที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก % )

| ความเร็ว<br>ในการเคลื่อนที่ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 40 องศา      |                                |                               |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                             | อัตราความเครียดหลัก % (จุดที่ 2) |                                |                               |
|                             | ความเร็วรอบ 200<br>รอบต่อนาที    | ความเร็วรอบ 400 รอบ<br>ต่อนาที | ความเร็วรอบ 600รอบ<br>ต่อนาที |
| 100 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที    | 58.81%                           | 59.06%                         | 61.17%                        |
| 200 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที    | 61.67%                           | 60.14%                         | 61.89%                        |
| 300 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที    | 63.76%                           | 61.94%                         | 62.22%                        |

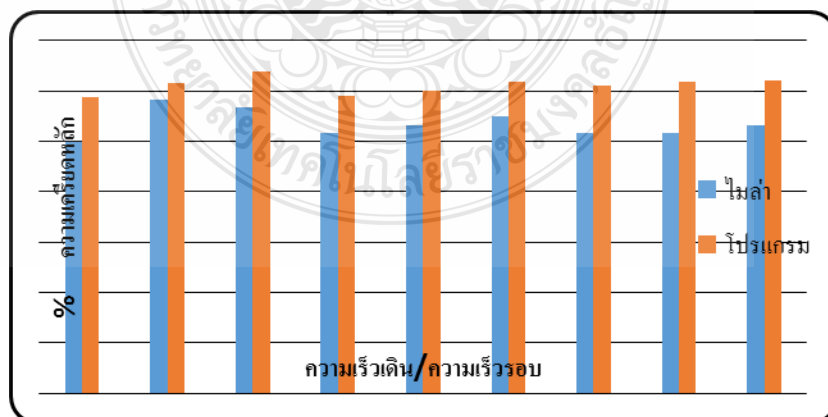
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.7 (ภาคผนวก ๓)

โดยในการขึ้นรูปที่ มุม 40 องศา ลักษณะของวงกลมกริดที่เปลี่ยนไปที่เกิดจากการขึ้นรูปจะมีลักษณะยืดออกแต่ไม่มากเท่ากับ ปัจจัยที่มุม 30 องศา จากการถูกขึ้นรูปในแนวแกน ทำให้เราสามารถคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้น ที่จากความยาวที่เปลี่ยนไปจากการยืดที่ผิวชิ้นงาน เมื่อเทียบกับกับยาวเดิม โดยจะทำการทดลอง 3 จุดหลัก ดังรูปที่ 4.12



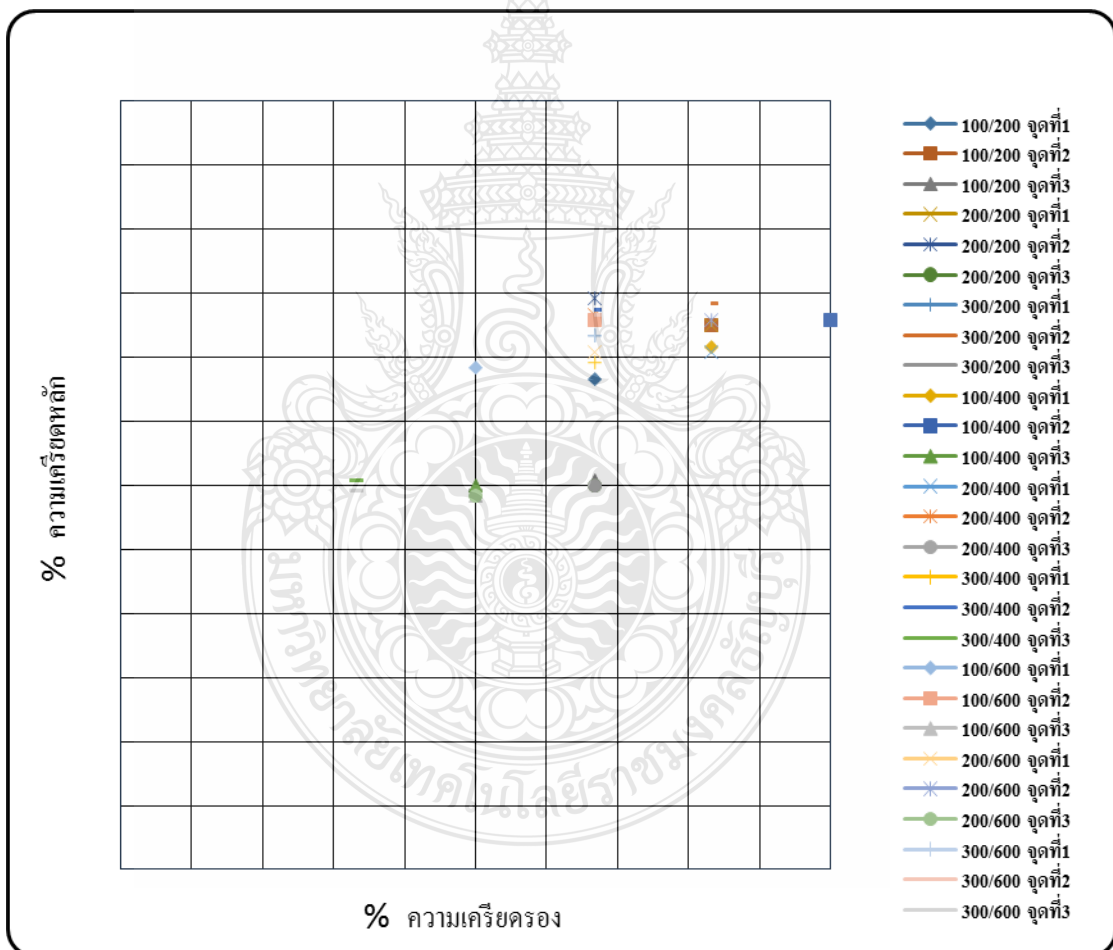
รูปที่ 4.12 รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

จากผลการทดลองวัดค่าความเครียดที่จุดยืดออกสูงสุด (จุดที่ 2) ที่เกิดขึ้นจากระบวนการขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา ด้วยตัวแปรที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรมเปรียบเทียบกับแผ่นไม้อัดพบว่า % ความเครียดหลักที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกันไม่มาก ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ 5-11% ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่นไม้อัด และโปรแกรมที่มุม 40 องศา (จุดที่ 2)

จากผลการทดลองพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากระบบขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป (Speed) และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกันพบว่า อัตราความเครียดหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้น เกิดจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 58.81 % และพบว่า อัตราความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 63.76 % ในการวัดด้วยโปรแกรม ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไม  
 ถ้ำที่มุม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

| ปัจจัยการทำงาน<br>ความเร็วเดิน/<br>ความเร็วรอบ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 50 องศา |          |          |
|--|-----------------------------|----------|----------|
|  | อัตราความเครียดหลัก %       |          |          |
|  | จุดที่ 1                    | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |
| 100/200  | 28.33%                      | 35%      | -3.33%   |
| 200/200  | 26.67%                      | 31.67%   | -1.67%   |
| 300/200  | 31.67%                      | 30%      | -1.67%   |
| 100/400  | 30%                         | 30%      | 1.67%    |
| 200/400  | 31.67%                      | 33.33%   | 0%       |
| 300/400  | 26.67%                      | 33.33%   | 0%       |
| 100/600  | 25%                         | 31.67%   | -1.67%   |
| 200/600  | 26.67%                      | 33.33%   | -3.33%   |
| 300/600  | 28.33%                      | 33.33%   | -3.33%   |

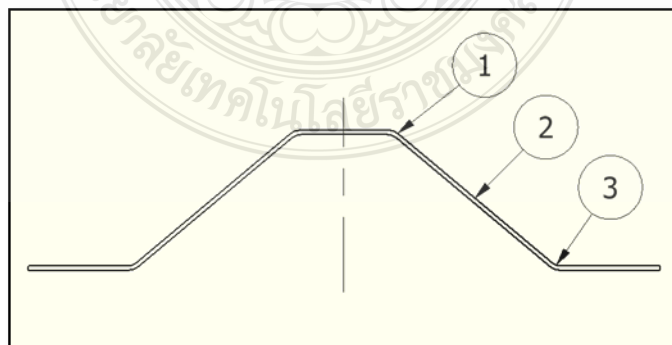
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.8 (ภาคผนวก ฉ)

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรม ที่มุม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

| ความเร็วในการเคลื่อนที่ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 50 องศา      |                            |                            |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                         | อัตราความเครียดหลัก % (จุดที่ 2) |                            |                            |
|                         | ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที       | ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที | ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที |
| 100 มิลลิเมตรต่อนาที    | 32.88%                           | 32.30%                     | 30.22%                     |
| 200 มิลลิเมตรต่อนาที    | 31.57%                           | 32.33%                     | 32.93%                     |
| 300 มิลลิเมตรต่อนาที    | 35.50%                           | 35.31%                     | 33.53%                     |

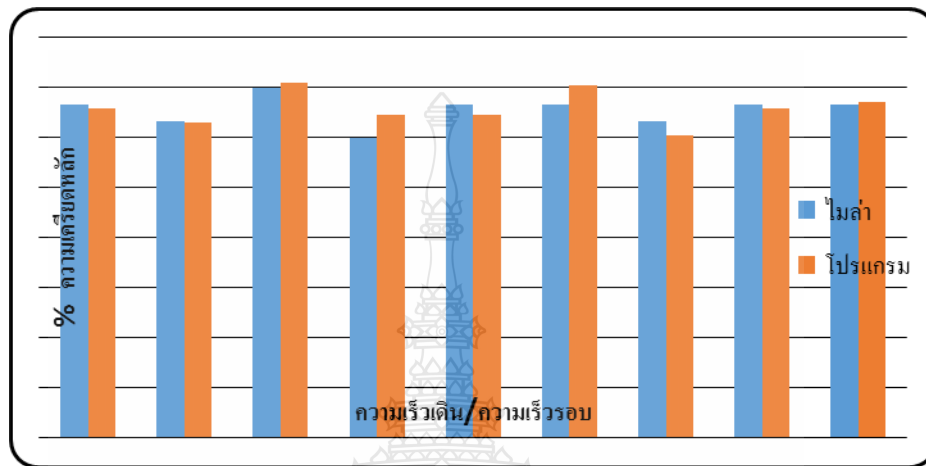
ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ๓.9 (ภาคผนวก ๓)

โดยในการขึ้นรูปที่ มุม 40 องศา ลักษณะของวงกลมกริดที่เปลี่ยนไปที่เกิดจากการขึ้นรูปจะมีลักษณะยืดออกน้อยที่สุดในทุกปัจจัยของมุมทั้งหมด จากการถูกขึ้นรูปในแนวแกน ทำให้เราสามารถคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้น ที่จากความยาวที่เปลี่ยนไปจากการยืดที่ผิวชิ้นงาน เมื่อเทียบกับยาวเดิม โดยจะทำการทดลอง 3 จุดหลัก ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

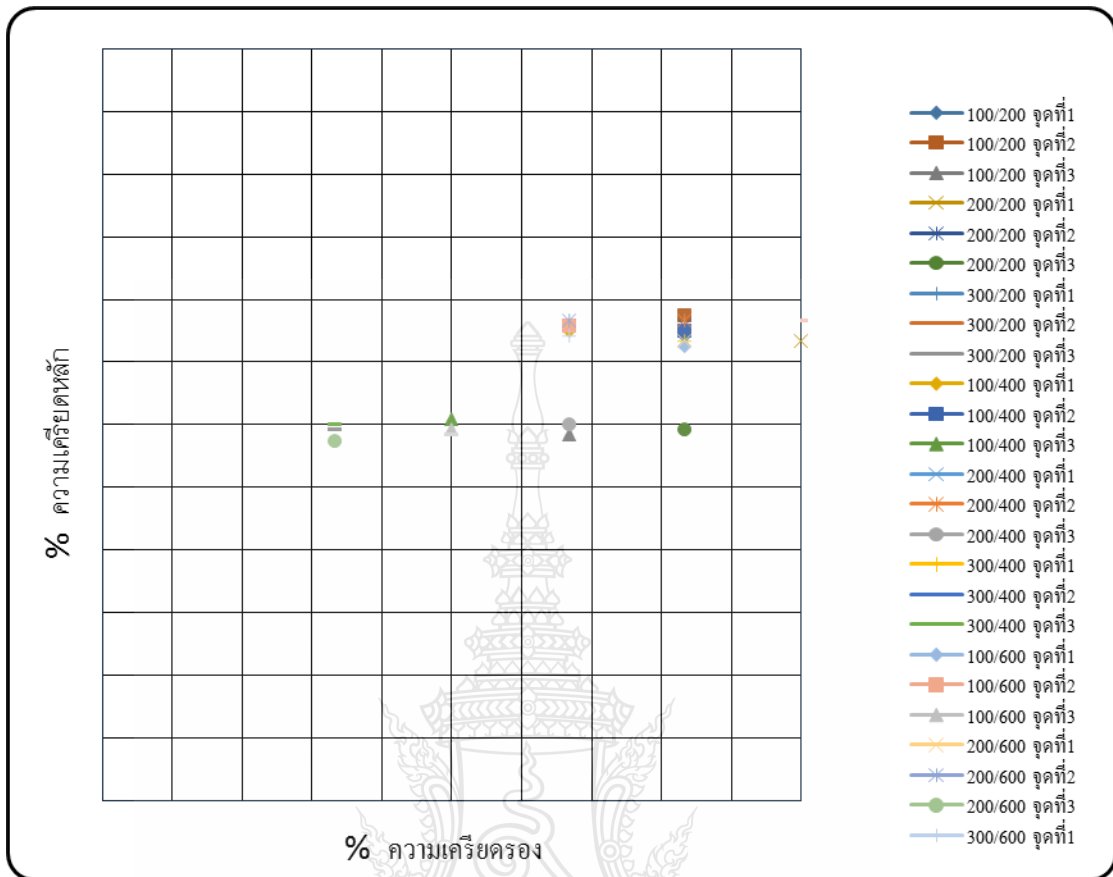
จากผลการทดลองวัดค่าความเครียดที่จุดยึดออกสูงสุด (จุดที่ 2) ที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา ด้วยตัวแปรที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรมเปรียบเทียบกับแผ่นไมลาพบว่า % ความเครียดหลักที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ 1-3% ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่นไมลา และโปรแกรมที่มุม 50 องศา (จุดที่ 2)

จากผลการทดลองพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากระบวนขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขึ้นรูป(Speed)และความเร็วที่ใช้ในการเดินขึ้นรูป (Feed) ที่แตกต่างกันพบว่า อัตราความเครียดหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้น เกิดจากการทดลองที่ทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 600 รอบต่อนาที คือ 30.22 % และพบว่า อัตราความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำการขึ้นรูปด้วยตัวแปร ความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที คือ 35.50 % ดังรูปที่ 4.17





รูปที่ 4.17 กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่ มุม 50 องศา

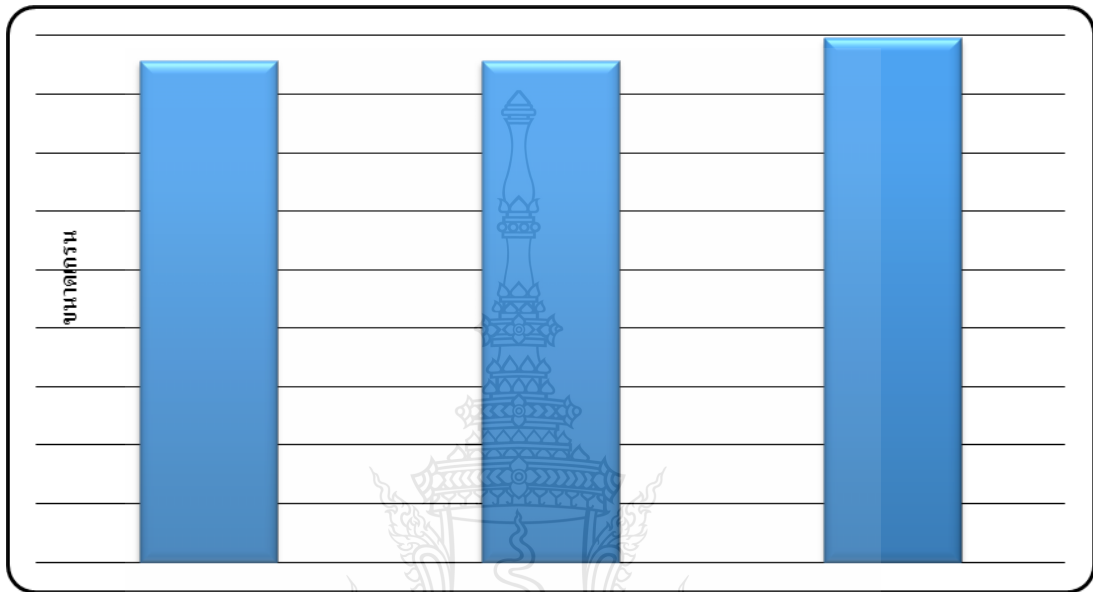
#### 4.1.4 ผลทดลองการวัดขนาดของเกรนภายในชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูป

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนในสภาพจำหน่าย ก่อนการขึ้นรูป

| ชิ้นงานที่ | ชิ้นงานทองแผ่นเหลือง<br>ก่อนการขึ้นรูป | ขนาดความโต<br>ของเกรน<br>(Size) |
|------------|--|---------------------------------|
| 1          | ชิ้นงานก่อนขึ้นรูป มุม 30 องศา         | 9.29                            |
| 2          | ชิ้นงานก่อนขึ้นรูป มุม 40 องศา         | 9.29                            |
| 3          | ชิ้นงานก่อนขึ้นรูป มุม 50 องศา         | 9.48                            |

ที่มา : จากการนำข้อมูลในรูปที่ ง.1, ง.2 และ ง.3 (ภาคผนวก ง)

จากการทดลองการวัดขนาดของเกรน มาตรฐาน ASTM E1382 - 97(2004) ในชิ้นงานสภาพจำหน่ายสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาสร้างกราฟแสดงค่าขนาดความโตเกรนก่อนการขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองก่อนการขึ้นรูป

จากการทดลองวัดค่าขนาดของเกรนภายในชิ้นงานทองเหลืองสภาพจำหน่าย ก่อนทำการขึ้นรูปโดยใช้มาตรฐาน ASTM E1382 - 97 (2004) มีขนาดของเกรนที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเกรนยังไม่ผ่านการรีดหรือการกดในกระบวนการขึ้นรูป

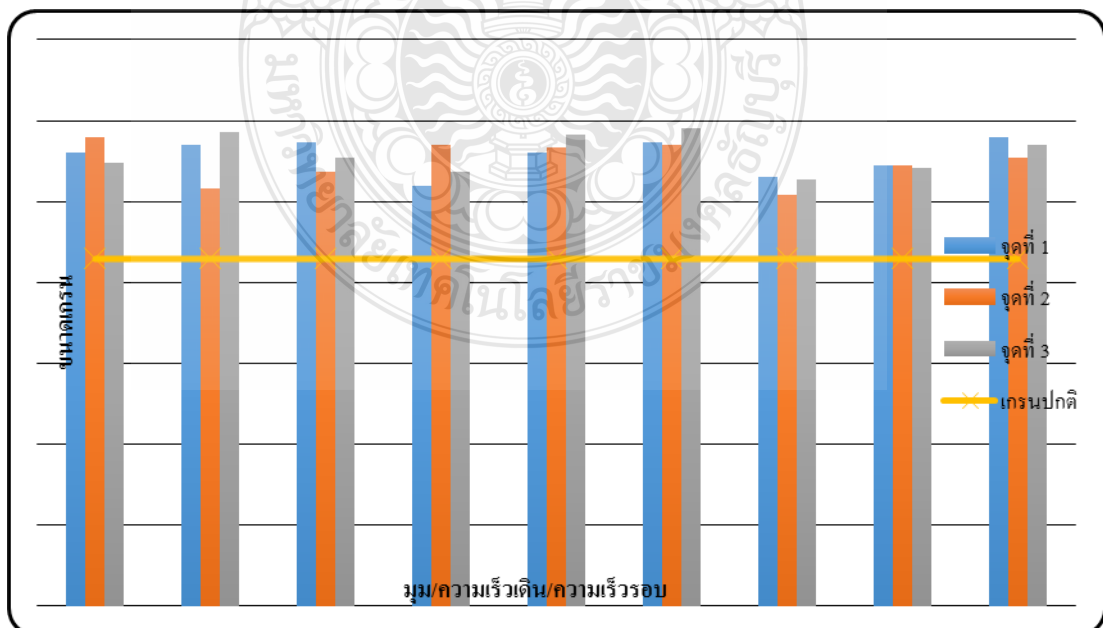
#### 4.1.5 ผลทดลองการวัดขนาดของเกรนภายในชิ้นงานที่เปลี่ยนไปหลังการขึ้นรูปชิ้นงาน

ในการทดลองจะทำการวัดขนาดที่เปลี่ยนแปลงของเกรนภายในชิ้นงาน หลังการขึ้นรูป โดยจะทดลองตำแหน่งเดียวกับการวัดค่าความเครียดผิว เพื่อทดลองเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง ของการวัดขนาดเกรนในชิ้นงานสภาพจำหน่ายและชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป ดังตารางที่ 4.11, 4.12 และ 4.13

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา

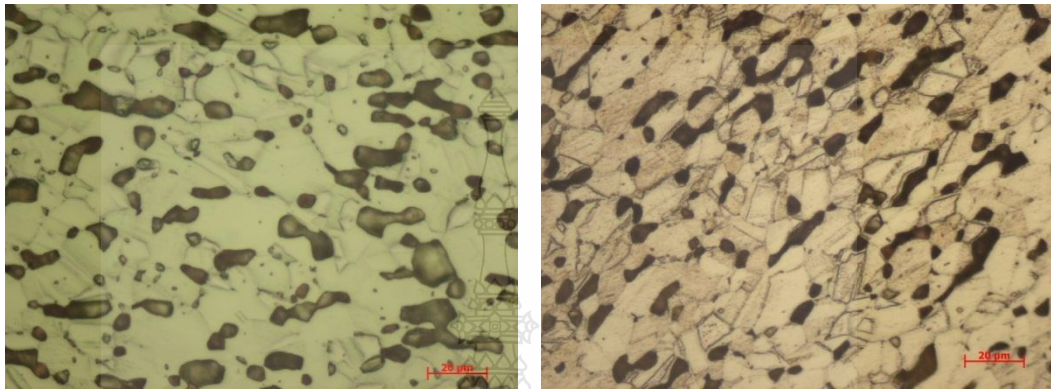
| ชิ้นงานที่ | ปัจจัยการขึ้นรูป |   |                            | ขนาดความโตของเกรน |         |         |
|------------|------------------|---|----------------------------|-------------------|---------|---------|
|            | มุม<br>(องศา)    | อัตราการเคลื่อน<br>(มิลลิเมตรต่อ<br>นาที) | ความเร็ว<br>(รอบ ต่อ นาที) | จุดที่1           | จุดที่2 | จุดที่3 |
| 1          | 30               | 100                                       | 200                        | 10.61             | 10.79   | 10.48   |
| 2          | 30               | 200                                       | 200                        | 10.70             | 10.16   | 10.85   |
| 3          | 30               | 300                                       | 200                        | 10.73             | 10.37   | 10.54   |
| 4          | 30               | 100                                       | 400                        | 10.19             | 10.70   | 10.37   |
| 5          | 30               | 200                                       | 400                        | 10.61             | 10.67   | 10.82   |
| 6          | 30               | 300                                       | 400                        | 10.73             | 10.70   | 10.91   |
| 7          | 30               | 100                                       | 600                        | 10.30             | 10.08   | 10.27   |
| 8          | 30               | 200                                       | 600                        | 10.44             | 10.44   | 10.41   |
| 9          | 30               | 300                                       | 600                        | 10.79             | 10.54   | 10.70   |

ที่มา : จากการนำข้อมูลในรูปที่ จ.1 (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.19 รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา

จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของเกรนภายในชิ้นงานที่มีการยึดตัวจากระบวนขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา จากรูปที่ 4.19 มีการยึดตัวของเกรนสูงที่สุด ที่ปัจจัยความเร็วเดินในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที โดยมีขนาดเท่ากับ 10.91



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.20 รูปการเปรียบเทียบ โครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 30 องศา กำลังขยาย 500X  
(ก) ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 30 (ข) ภาพเกรนทองเหลืองที่มีการยึดตัวสูงสุดที่มุม 30

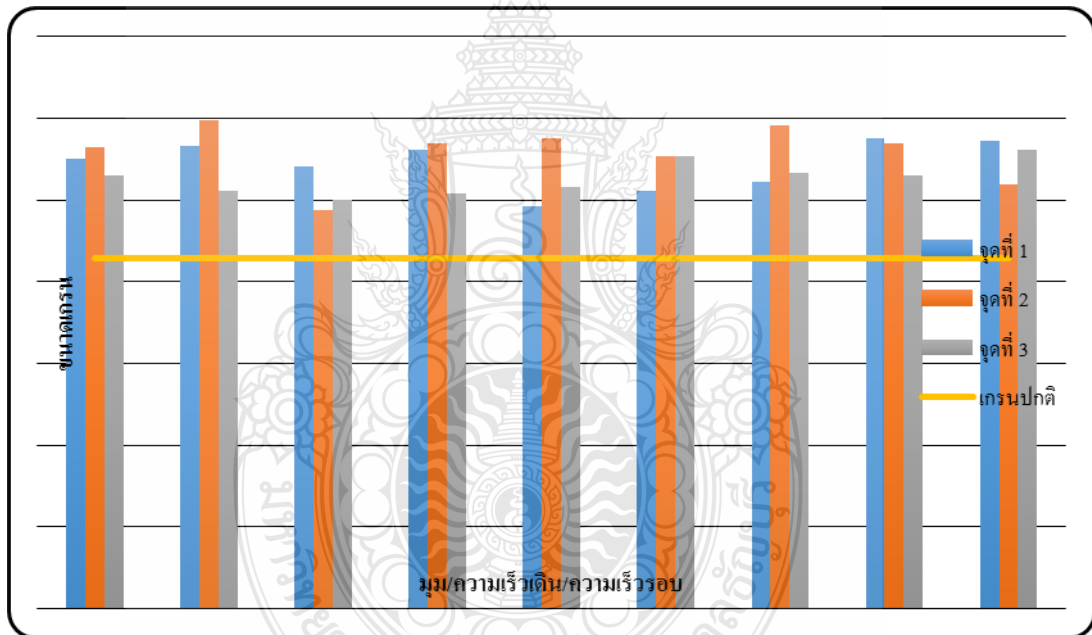
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา

| ชิ้นงานที่ | ปัจจัยการขึ้นรูป |   |                           | ขนาดความโตของเกรน |             |             |
|------------|------------------|---|---------------------------|-------------------|-------------|-------------|
|            | มุม<br>(องศา)    | อัตราการเคลื่อน<br>(มิลลิเมตรต่อ<br>นาที) | ความเร็ว<br>(รอบ ต่อนาที) | จุดที่<br>1       | จุดที่<br>2 | จุดที่<br>3 |
| 1          | 40               | 100                                       | 200                       | 10.51             | 10.64       | 10.30       |
| 2          | 40               | 200                                       | 200                       | 10.67             | 10.97       | 10.12       |
| 3          | 40               | 300                                       | 200                       | 10.41             | 9.88        | 10.00       |
| 4          | 40               | 100                                       | 400                       | 10.61             | 10.70       | 10.08       |
| 5          | 40               | 200                                       | 400                       | 9.92              | 10.76       | 10.16       |
| 6          | 40               | 300                                       | 400                       | 10.12             | 10.54       | 10.54       |
| 7          | 40               | 100                                       | 600                       | 10.23             | 10.91       | 10.34       |
| 8          | 40               | 200                                       | 600                       | 10.76             | 10.70       | 10.30       |

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา (ต่อ)

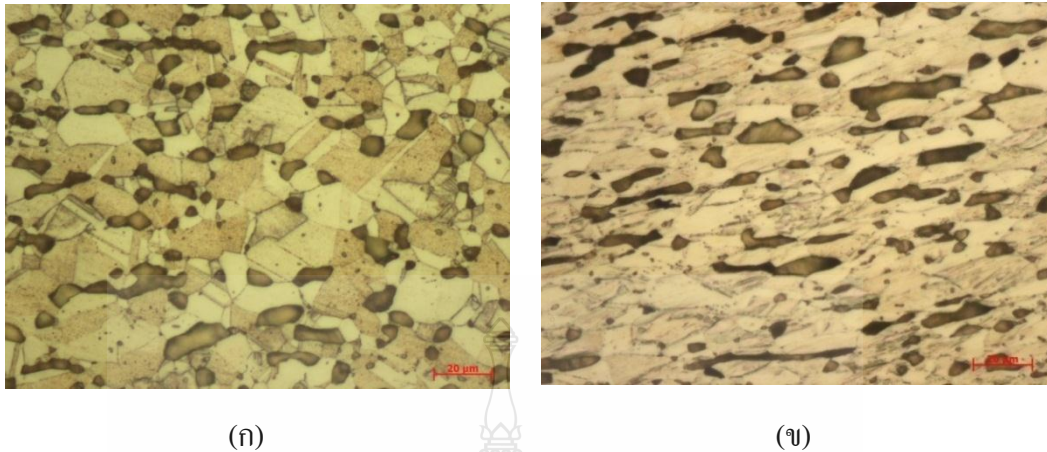
| ชั้นงานที่ | ปัจจัยการขึ้นรูป |   |                               | ขนาดความโตของเกรน |             |             |
|------------|------------------|---|-------------------------------|-------------------|-------------|-------------|
|            | มุม<br>(องศา)    | อัตราการ<br>เคลื่อน<br>(มิลลิเมตร<br>ต่อนาที) | ความเร็ว<br>(รอบ ต่อ<br>นาที) | จุดที่<br>1       | จุดที่<br>2 | จุดที่<br>3 |
| 9          | 40               | 300   | 600                           | 10.73             | 10.19       | 10.61       |

ที่มา : จากการนำข้อมูลในรูปที่ จ.2 (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.21 รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา

จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของเกรนภายในชั้นงานที่มีการยึดตัวจากระบวนขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา จากรูปที่ 4.21 มีการยึดตัวของเกรนสูงที่สุด ที่ปัจจัยความเร็วเดินในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที โดยมีขนาดเท่ากับ 10.97

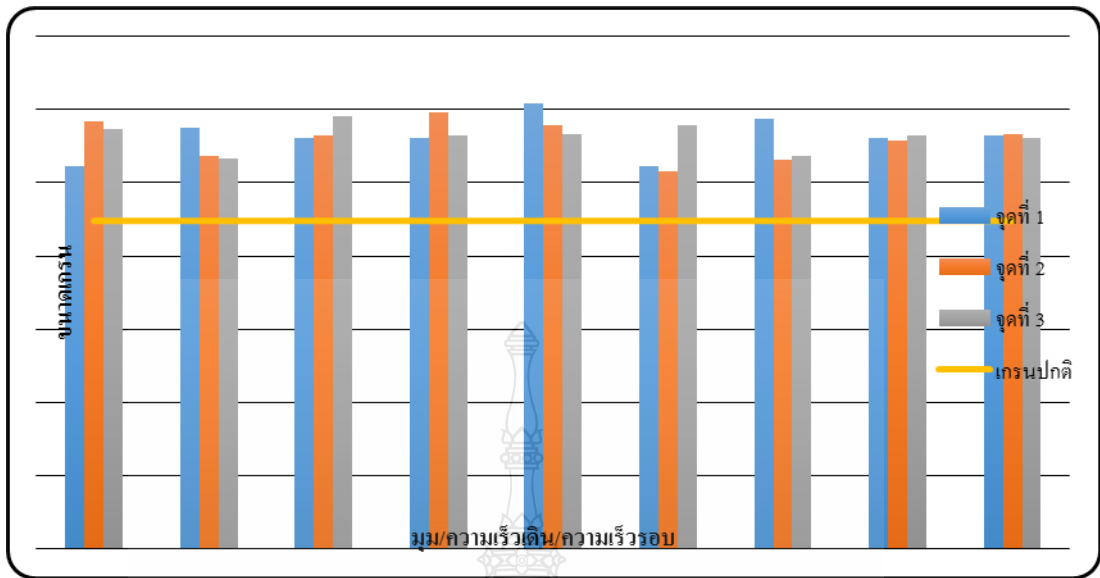


รูปที่ 4.22 รูปการเปรียบเทียบโครงสร้างทอกลีง ที่มุม 40 องศา กำลังขยาย 500X  
(ก) ภาพเกรนทอกลีงก่อนขึ้นรูป ที่มุม 40 (ข) ภาพเกรนทอกลีงที่มีการยึดตัวสูงสุดที่มุม 40

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา

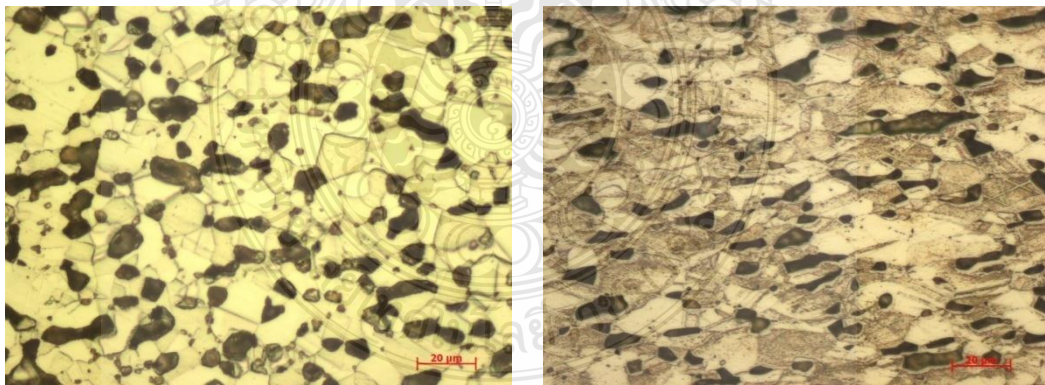
| ชิ้นงานที่ | ปัจจัยการขึ้นรูป |  |                           | ขนาดความโตของเกรน |             |             |
|------------|------------------|--|---------------------------|-------------------|-------------|-------------|
|            | มุม<br>(องศา)    | อัตราการเคลื่อน<br>(มิลลิเมตรต่อ<br>นาที่) | ความเร็ว<br>(รอบ ต่อนาที) | จุดที่<br>1       | จุดที่<br>2 | จุดที่<br>3 |
| 1          | 50               | 100  | 200                       | 10.23             | 10.85       | 10.73       |
| 2          | 50               | 200  | 200                       | 10.76             | 10.37       | 10.34       |
| 3          | 50               | 300  | 200                       | 10.61             | 10.64       | 10.91       |
| 4          | 50               | 100  | 400                       | 10.61             | 10.97       | 10.64       |
| 5          | 50               | 200  | 400                       | 11.08             | 10.79       | 10.67       |
| 6          | 50               | 300  | 400                       | 10.23             | 10.16       | 10.79       |
| 7          | 50               | 100  | 600                       | 10.88             | 10.31       | 10.37       |
| 8          | 50               | 200  | 600                       | 10.61             | 10.57       | 10.64       |
| 9          | 50               | 300  | 600                       | 10.64             | 10.67       | 10.61       |

ที่มา : จากการนำข้อมูลในรูปที่ จ.3 (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.23 รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา

จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของเกรนภายในชิ้นงานที่มีการยึดตัวจากระบวนขึ้นรูปในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา จากรูปที่ 4.23 มีการยึดตัวของเกรนสูงที่สุด ที่ปัจจัยความเร็วเดินในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที โดยมีขนาดเท่ากับ 11.08



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.24 รูปการเปรียบเทียบโครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 50 องศา กำลังขยาย 500X

(ก) ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 50 (ข) ภาพเกรนทองเหลืองที่มีการยึดตัวสูงสุดที่มุม 50

## 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

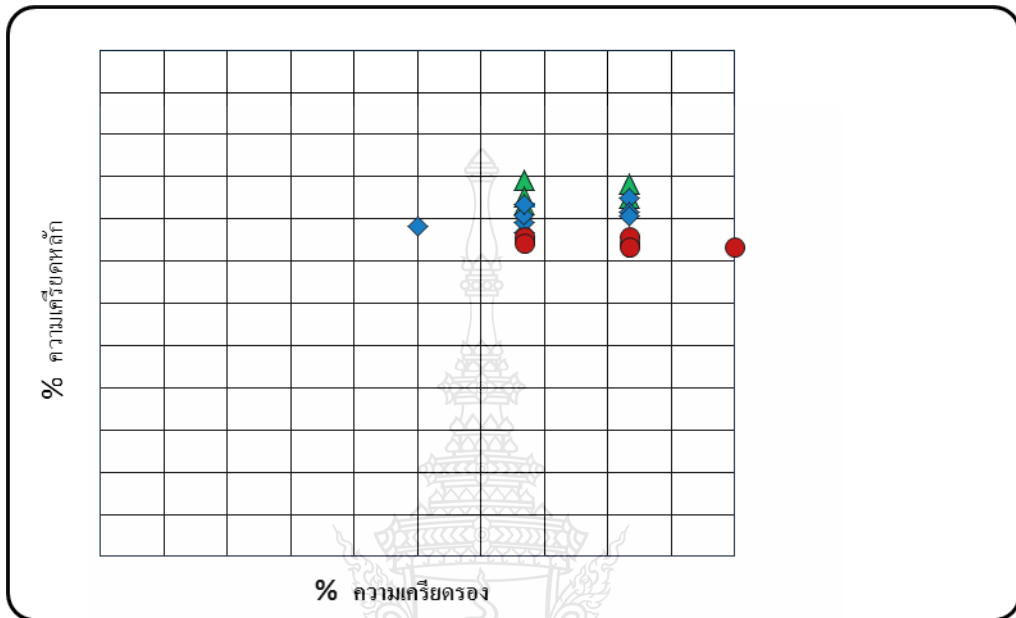
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการทำงานกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะทำการวิเคราะห์ผลจากปัจจัยการทำงานที่มีต่อผลต่อกระบวนการทำงานได้แก่ การศึกษาความหนาที่เปลี่ยนไป และศึกษาความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของแต่ละปัจจัย

### 4.2.1 วิเคราะห์ผลของปัจจัยในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

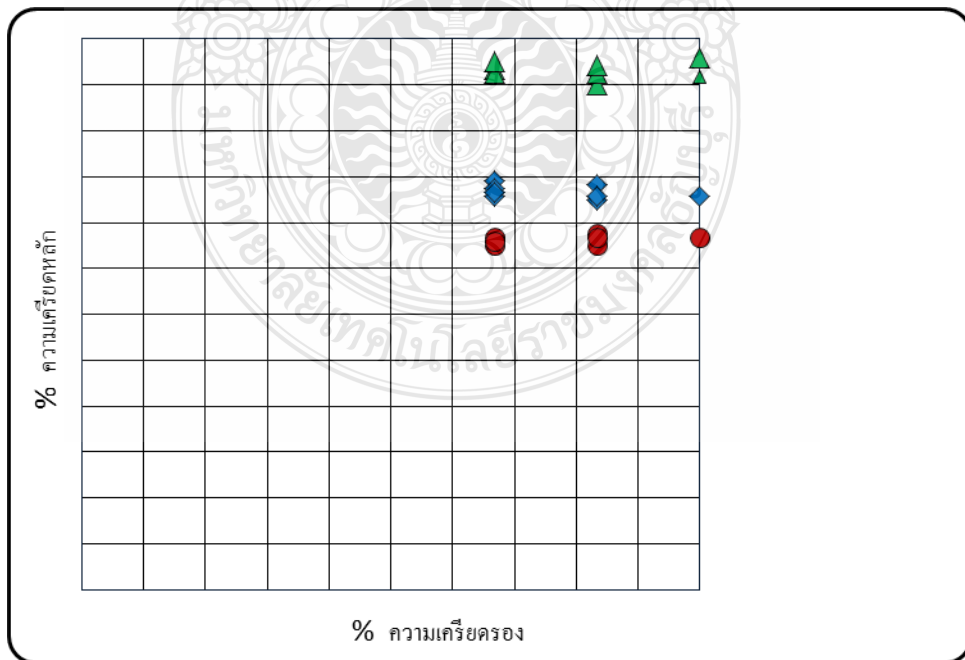
จากผลการทดลองวัดค่าที่ได้จากการวัดความเครียดที่ผิวชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรมและแผ่นไมล่า พบว่าค่าที่ได้จากการวัดค่าความเครียดด้วยแผ่นไมล่า จะมีค่าแตกต่างจากการวัดโดยใช้โปรแกรม ประมาณ 3-11% และการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปคือ ปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปและความเร็วในการเดินขึ้นรูปในการทดลองพบว่า อัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสูงสุดในแต่ละมุม คือการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา ด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที เท่ากับ 118.49% , การขึ้นรูปที่มุม 40 องศาด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที เท่ากับ 63.76% และการขึ้นรูปที่มุม 50 องศาด้วยตัวแปร ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที เท่ากับ 35.50% นั้น จากผลการทดลองทำให้เห็นได้ว่า เมื่อมุมที่ทำการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น อัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานจะลดลง ซึ่งค่าความเครียดต่ำสุดจะอยู่ที่มุม 50 องศา และในส่วนความเร็วในการเดินขึ้นรูป นั้น จากการผลทดลองการขึ้นรูป ในมุมที่แตกต่างกันและความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกันนั้น พบว่าอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสูงสุดจะเกิดขึ้น ที่ความเร็วในการเดินขึ้นรูป 300 มิลลิเมตรต่อนาที ใน ทุกปัจจัยมุมที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่ผิวนอกสุดของชิ้นงานที่จะแปรผันตามมุมของการตัดขึ้นรูป และความเร็วเดินที่ส่งผลกับค่าความเค้นของชิ้นงานจากการกดขึ้นรูป ซึ่งเป็นไปตามผลงานวิจัยของ นายธงชัย เจริญจันทร์ดี ที่กล่าวไว้ว่าเมื่อมุมที่ทำการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ตามลำดับ อัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน ก็ลดลงอย่างมาก และในส่วนความเร็วในการเดินขึ้นรูป นั้น จากการผลทดลองการขึ้นรูป ในแต่ละมุมและความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันนั้น พบว่าอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสูงสุดจะเกิดขึ้น ที่ความเร็วในการเดินขึ้นรูป 300 มิลลิเมตรต่อนาที ใน ทุกๆมุมที่ทำการขึ้นรูปดังนั้นปัจจัยมุมที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยก่อให้เกิด



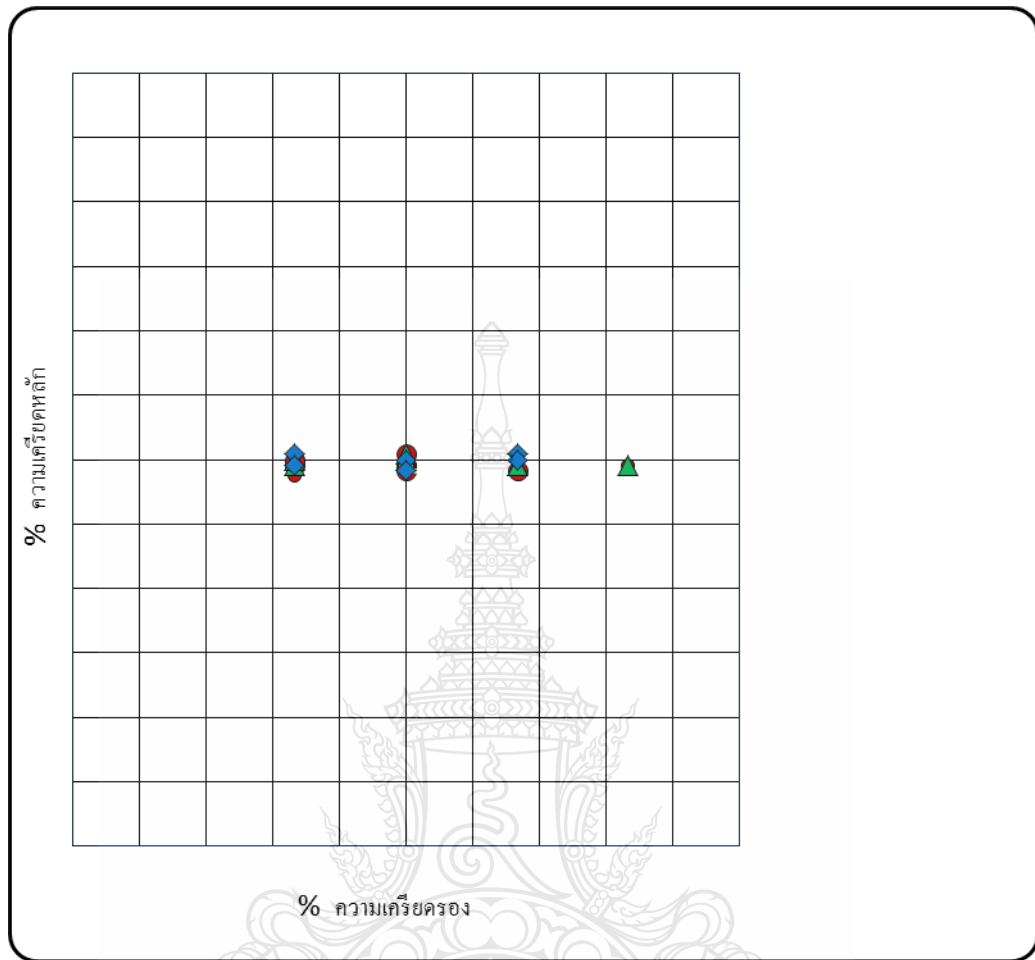
อัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานต่ำสุด คือการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา และ ความเร็วในการเดินขึ้นรูปของอุปกรณ์ที่ความเร็วต่ำกว่า 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27



รูปที่ 4.25 อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 1

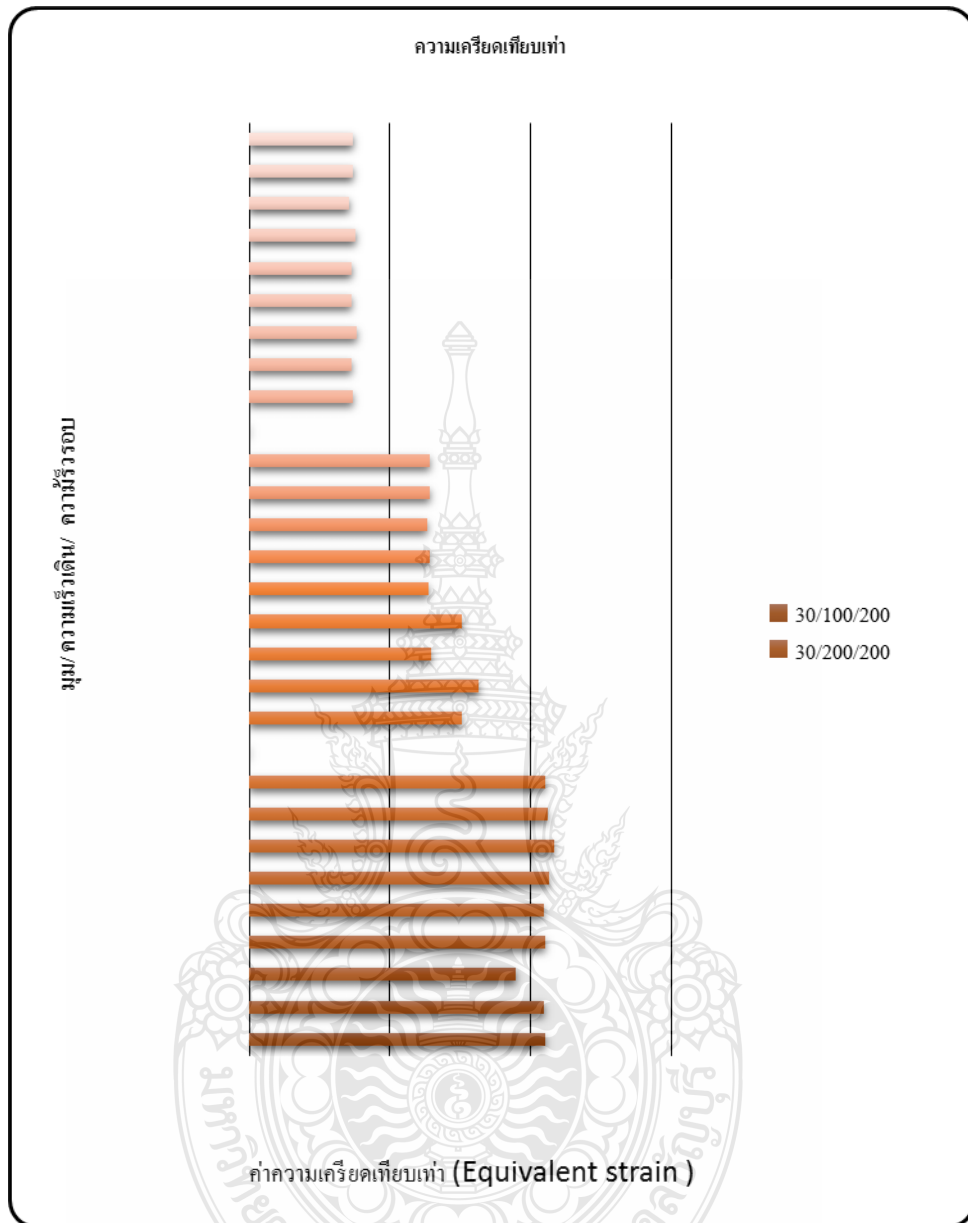


รูปที่ 4.26 อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 2



รูปที่ 4.27 อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 3

จากผลการทดลองได้นำค่าที่ได้จากการวัดความเครียดผิวชิ้นงานในจุดที่เกิดความเครียดสูงสุด(จุดที่ 2) และความหนาที่เปลี่ยนไปในจุดเดียวกับค่าความเครียดสูงสุด มาทำการวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่วัดได้กับค่าความเครียดเทียบเท่า พบว่าค่าความเครียดเทียบเท่าโดยรวมจะมีความสัมพันธ์ กับค่าที่ได้จากความเครียดผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 กราฟอัตราความเครียดเทียบเท่าที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆในการขึ้นรูป จุดที่ 2

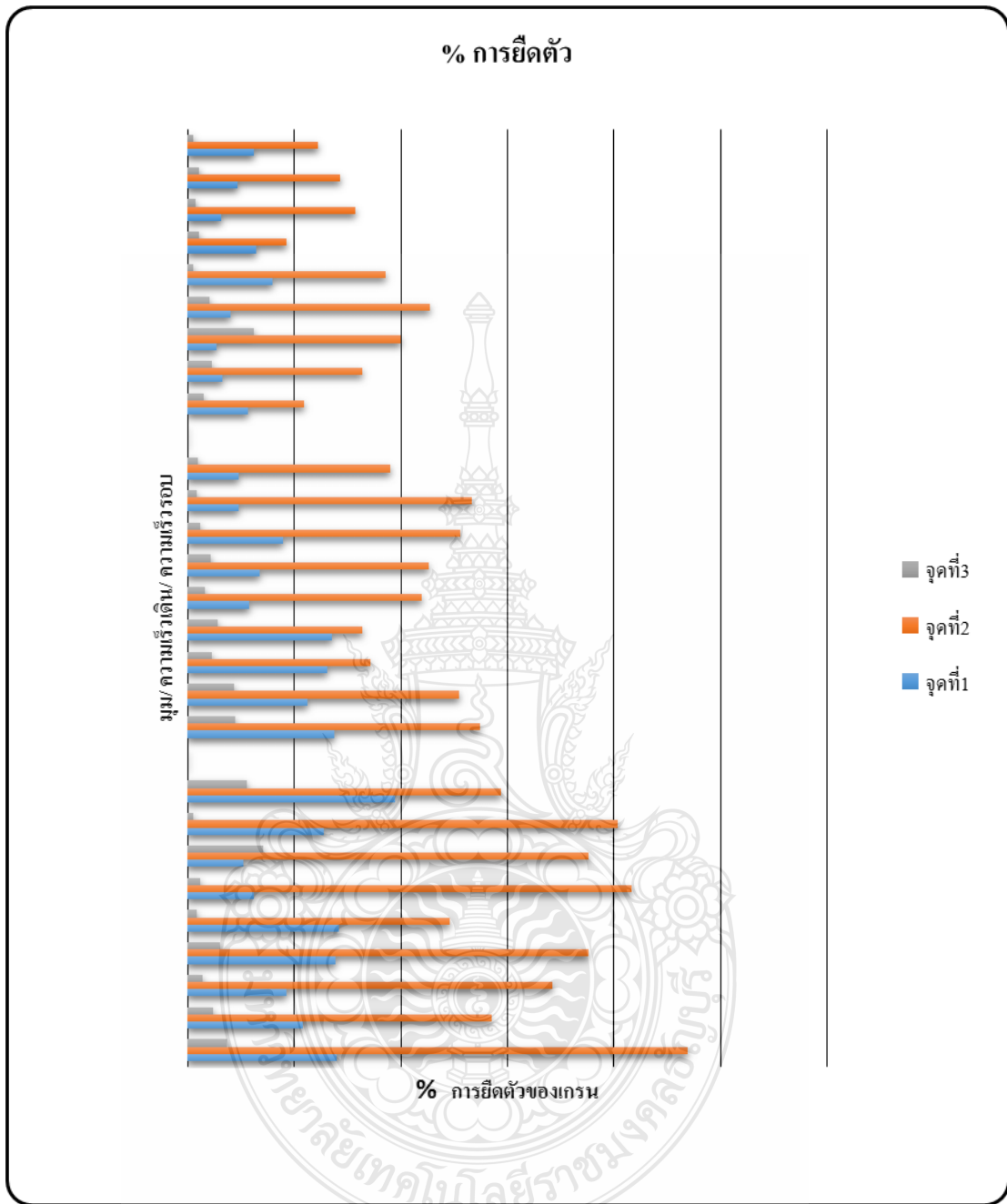
#### 4.2.2 วิเคราะห์ผลของปัจจัยในการขึ้นรูปที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการวัดขนาดเกรนภายในชิ้นงานในสภาพก่อนการขึ้นรูป มีขนาดเท่ากับ 9.29 - 9.48 และจากการวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูป ชิ้นงานที่มุม 30 องศา ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที มีขนาดเกรนละเอียดที่สุดในจุดที่ 3 เท่ากับ 10.91 , ที่มุม 40 ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที

และความเร็วในการหมุน 200 รอบต่อนาที มีขนาดเกรนละเอียดที่สุดในจุดที่ 2 เท่ากับ 10.97 ,ที่มุม 50 ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที มีขนาดเกรนละเอียดที่สุดในจุดที่ 1 เท่ากับ 11.08 จากผลการทดลองเห็นได้ว่าขนาดของเกรนที่ถูกกดจากการขึ้นรูปทุกปัจจัยการขึ้นรูปในทั้ง 3 จุด ที่ทำการทดลองจะมีค่าความละเอียดของเกรนที่ใกล้เคียงกันมาก และจะมีค่าที่ละเอียดที่สุดที่สุดของเกรน ของปัจจัยทุกมุมอยู่ในจุดทั้ง 3 แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 จุด ของชิ้นงานที่มีการขึ้นรูป ต่างก็มีความละเอียดของเกรนและยังใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากทั้ง 3 จุดนั้น ต่างก็มีการยึดและหลุดตัวจากความเค้นดึงและความเค้นอัด ที่เกิดจากการตัดในกระบวนการขึ้นรูป แต่เนื่องด้วยโลหะที่บางจึงทำให้เกิดการไหลตัวที่น้อยทำให้ขนาดเกรนเปลี่ยนไปจากเดิมไม่มากนัก

จากผลการทดลองได้นำค่าที่ได้จากการวัดขนาดความโตของเกรนภายในชิ้นงานในจุด ที่ทำการวัดขนาดทั้งหมด มาทำการวิเคราะห์อัตราการยึดตัวของเกรนหลังการขึ้นรูป พบว่าปัจจัยของมุมในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา มีอัตราการยึดตัวสูงที่สุด และอัตราการยึดตัวต่ำที่สุด คือ มุม 50 องศา ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการยึดตัวของเกรนจะมีความสอดคล้องกับอัตราความเครียดผิวชิ้นงาน และค่าความเครียดเทียบเท่า ของปัจจัยมุมทั้งหมด ดังรูปที่ 4.29





รูปที่ 4.29 กราฟอัตราการยึดตัวของเกรนที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆในการขึ้นรูป

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน โลหะแผ่นทองเหลืองที่เกิดจากปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจะใช้วัสดุโลหะตามมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาด ยาว 60 มิลลิเมตร โดยที่ปลายมีรูปร่างครึ่งวงกลม รัศมี 10 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ในการขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด บนวัสดุชิ้นงานแผ่นทองเหลือง โดยใช้จารบีเกรด 306 ที่ใช้ในการหล่อลื่นและระบายความร้อนในขณะทำการขึ้นรูปและมีปัจจัยในการทำงาน ได้แก่ปัจจัยของ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินขึ้นรูป, ความเร็วรอบในการหมุนของอุปกรณ์ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูป โดยจะทำการศึกษาถึงความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปตามผลกระทบของปัจจัยที่เกิดขึ้นและการศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาคของแผ่นทองเหลืองหลังกระบวนการขึ้นรูป ทำให้สามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ดังนี้คือ

##### 5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงาน

###### 1) มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปที่มุม 30,40 และ 50 องศา พบว่า ค่าความเครียดผิวหลักที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยมุมที่กำหนด แสดงให้เห็นได้ว่าจะมีค่าที่สูงขึ้นตามมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ลดลง โดยค่าของความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูป จะผกผันกับมุมที่ใช้ในการขึ้นรูป กล่าวคือมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ ความเครียดหลักที่เกิดขึ้น บนพื้นผิวก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยโดยมุมที่ก่อให้เกิดความเครียดหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานสูงสุดคือมุม 30 องศาเท่ากับ 118.49 % และความเครียดหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานต่ำสุดที่มุม 50 องศาเท่ากับ 35.50 %

###### 2) ความเร็วในการเดินขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูปโดยทำการขึ้นรูปด้วยความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 100,200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ มุมในการขึ้นรูปและความเร็วในการหมุนที่เท่ากันนั้น พบว่าค่าของความเครียดหลักที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว จากการ

ผลทดลองการขึ้นรูป ในแต่ละมุมและความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันนั้น พบว่า อัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความเร็วในการเดินขึ้นรูป 300 มิลลิเมตรต่อนาที จะมีค่าสูงสุด มากกว่าค่าอัตราของความเครียดที่ เกิดขึ้นจากปัจจัยความเร็วในการเดินขึ้นรูปที่ 100,200 มิลลิเมตรต่อนาที ใน ทุกๆมุมที่ทำการขึ้นรูป

### 3) ความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป

การทดลองปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป โดยทำการขึ้นรูปด้วยปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนขึ้นรูป ที่ 200,400 และ 600 รอบต่อนาทีและใช้ความเร็วในการเดินขึ้นรูปและมุมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีค่าเท่ากันนั้น พบว่าค่าของพบว่าค่าของความเครียดหลักที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก

จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยมุมที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยก่อให้เกิดอัตราของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานต่ำสุด คือการขึ้นรูปที่มุม 50 องศาและความเร็วในการเดินขึ้นรูปของอุปกรณ์ที่ความเร็ว ที่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตรต่อนาที

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

จากผลการทดลองโดยทำการตัดชิ้นงานผ่าครึ่งในแนวแกน แล้วทำการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปในจุดต่างๆ พบว่า ตำแหน่งที่มีขีดออกมากที่สุดในการขึ้นรูปนั้นได้แก่ตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นบริเวณใกล้ขอบมุมด้านล่าง และตำแหน่งที่ 5 ที่ขอบมุมด้านล่างโดยในการขึ้นรูปโดย

- 1) ที่มุม 30 องศาในตำแหน่งที่ 4 มีความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.21 มิลลิเมตรและในตำแหน่งที่ 5 ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตร
- 2) ที่มุม 40 องศาในตำแหน่งที่ 4 มีความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตรและในตำแหน่งที่ 5 ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.53 มิลลิเมตร
- 3) ที่มุม 50 องศาในตำแหน่งที่ 4 มีความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.42 มิลลิเมตรและในตำแหน่งที่ 5 ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.55 มิลลิเมตร

จะเห็นได้ว่า ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับความหนาเดิม คือ 0.6 มิลลิเมตรนั้น อัตราการยึดตัว ที่การขึ้นรูปที่มุม 30 องศาซึ่งมีค่าความหนาของชิ้นงานต่ำสุด คือ 0.21 มิลลิเมตร จากการคำนวณอัตราการยึดตัวเฉลี่ยในจุดที่มีความหนาต่ำสุดจะมีค่าอัตราการยึดตัว เท่ากับ 89.14 % ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมาก คือ จากปกติ 31.6 % ซึ่งบ่งบอกได้ว่า กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดนั้น สามารถเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปแผ่น โลหะทองเหลือง ได้อย่างดี

#### 5.1.3 ปัจจัยขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30, 40 และ 50 องศา

จากการทดลองโดยทำการตัดผ่าชิ้นงาน เพื่อทำการศึกษาโครงสร้าง โดยทำการวัดขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยผลการทดลองที่ได้จากการวัดขนาดเกรนภายในชิ้นงานในสภาพ

ก่อนการขึ้นรูป มีขนาดเท่ากับ 9.29 - 9.48 และจากการวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูป ด้วยมุมและปัจจัยในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดเกรนมีการยึดตัวไปจากเดิมไม่มากและมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยทำการเปรียบเทียบกับขนาดเกรนก่อนขึ้นรูป

1) การขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

ในการวัดขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป ที่มุม 30 องศา จะมีขนาดเกรนเฉลี่ยในจุดที่ 1 เท่ากับ 10.56 จุดที่ 2 เท่ากับ 10.49 และจุดที่ 3 เท่ากับ 10.59

2) การขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

ในการวัดขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป ที่มุม 40 องศา จะมีขนาดเกรนเฉลี่ยจุดที่ 1 เท่ากับ 10.44 จุดที่ 2 เท่ากับ 10.58 และจุดที่ 3 เท่ากับ 10.27

3) การขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

ในการวัดขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป ที่มุม 50 องศา จะมีขนาดเกรนเฉลี่ยจุดที่ 1 เท่ากับ 10.61 จุดที่ 2 เท่ากับ 10.59 และจุดที่ 3 เท่ากับ 10.63

จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยมุมและปัจจัยในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันทั้งหมด ในจุดที่ 1, 2 และ 3 เมื่อเทียบกับการวัดความหนาในจุดที่ 4 ซึ่งก็คือ จุดที่ 2 ที่ทำการทดลองนั้น จะมีการยึดตัวมากทำให้มีความบางมากที่สุด แต่ในการทดลองวัดขนาดเกรนนั้น ความละเอียดของเกรนในจุดนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับ จุดที่ 1 และจุดที่ 3 มาก เนื่องจาก จุดที่ 2 มีการลากหรือรีดจากการขึ้นรูปเกิดการยึดตัวของเกรนมาก ขึ้นงานจุดนี้จึงบาง แต่จะมีความละเอียดไม่มาก เพราะเกรนจะอยู่ในรูปแนวยาว

จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่า ในปัจจัยการขึ้นรูปทั้งหมด ค่าที่ได้จากการทดลองวัดขนาดของเกรน จะมีค่าโดยเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก ในทุกจุดที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

1) ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดด้วยเครื่องจักร CNC นั้น ควรเลือกใช้เครื่องจักรที่ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนต่างๆมีความเที่ยงตรงในการทำงานสูงและมีการบำรุงรักษา ที่ดีเพราะอาจทำค่าต่างๆที่วัดได้ในการขึ้นรูปมีค่าไม่คงที่

2) ในการใช้แผ่นไมลา (Mylar tape or Strain tape) วัดค่าความเครียดผิวชิ้นงานในการวัดการเปลี่ยนแปลงของวงกริด จะได้ค่าที่ไม่ละเอียดมากเนื่องจากสเกลมีระยะห่างของความเครียด



ต่างกันเท่ากับ 5 % ความผิดพลาดจะมีค่อนข้างสูงเพราะวงกริดมีขนาดเล็ก ควรจะใช้แว่นขยายหรือกล้อง Microscope ในการวัด จะช่วยให้ความผิดพลาดน้อยลง

### 5.2.2 ปัญหาและอุปสรรค

1) ในการถ่ายภาพวงกริดเพื่อใช้ในการวัดขนาดกริดที่เปลี่ยนแปลงไปในการถ่ายภาพของทุกๆชิ้นงานจะต้องมี ระยะโฟกัสการถ่ายที่เท่ากัน เพื่อความเที่ยงตรงในการวัดขนาดของวงกริด

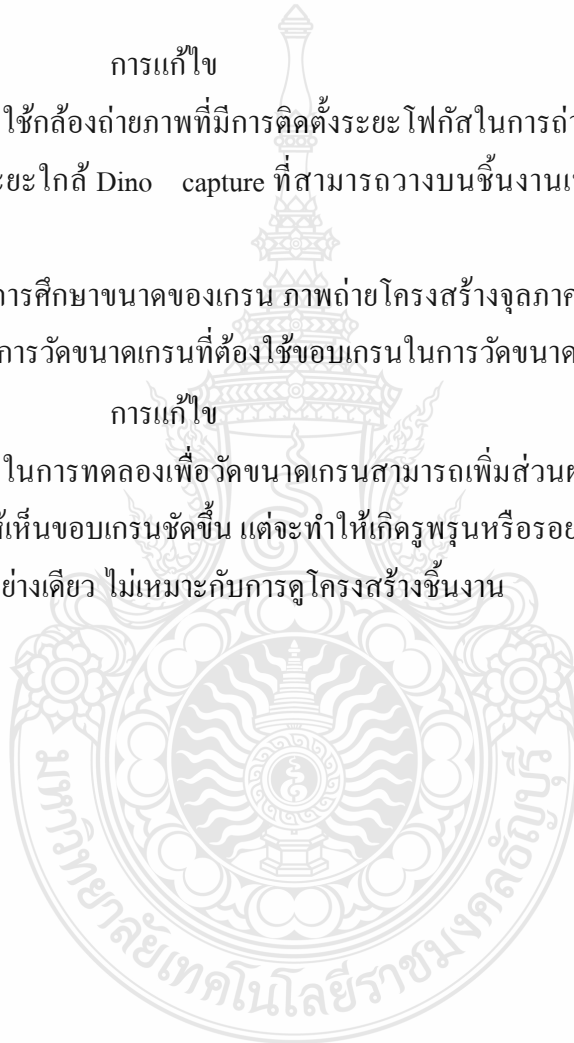
- การแก้ไข

ใช้กล้องถ่ายภาพที่มีการติดตั้งระยะโฟกัสในการถ่ายภาพ ซึ่งในการทดลองได้ใช้กล้องถ่ายภาพระยะใกล้ Dino capture ที่สามารถวางบนชิ้นงานเพื่อถ่ายภาพในระยะโฟกัสเดียวกันได้

2) ในการศึกษาขนาดของเกรน ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคมองไม่เห็นขอบเกรนอย่างชัดเจน ซึ่งจำเป็นต่อการวัดขนาดเกรนที่ต้องใช้ขอบเกรนในการวัดขนาดด้วยโปรแกรม

- การแก้ไข

ในการทดลองเพื่อวัดขนาดเกรนสามารถเพิ่มส่วนผสมของกรดที่ใช้ในการกัดผิวชิ้นงาน จะช่วยให้เห็นขอบเกรนชัดเจน แต่จะทำให้เกิดรูพรุนหรือรอยไหม้ ภาพที่ได้จะใช้ในการวัดขนาดเกรนเพียงอย่างเดียว ไม่เหมาะกับการดูโครงสร้างชิ้นงาน



## บรรณานุกรม

- [1] L. Fratini G Ambrogio, R Di Lorenzo, L. Filice, F. Micari, Influence of mechanical properties of the sheet material in single point incremental forming , CRIP Ann.53 (1) (2004) 207-210
- [2] ชงชัย เฟื่องจันทร์ดี. “อิทธิพลของการขึ้นรูปโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยสัมผัสเป็นจุดโดยทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [3] J. Jeswiet, rapid proto-typing with incremental single point forming , CAD/CAM Comput. Graphics 15 (2000) 177-183
- [4] มนต์ สติระจินดา. 2543. “โลหะนอกกลุ่มเหล็ก” สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พิมพ์ครั้งที่ 4)
- [5] กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์, การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นส่วนหม้อกรองอากาศรถยนต์
- [6] คมสันต์ งามขำ ชิดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา (2008 )
- [7] ทฤษฎีการขึ้นรูปงานโลหะแผ่นโดยการตัดงอ. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/TEN437/main/e-learning/lessen/04/main.htm>
- [8] สวัสดิ์ โสตามุข. 2550. “การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป.” สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [9] มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์. 2546. “งานทดลองวัสดุอุตสาหกรรม”(ฉบับปรับปรุง) กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
- [10] ASM Handbook Volume 09. Metallurgy and Microstructures.(2004)
- [11] 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
- [12] Kathryn Jackson , Julian Allwood , The mechanic of incremental sheet forming , Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) II58-II74
- [13] 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
- [14] 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
- [15] J.Kopac , Z.Kampus ,Incremental sheet metal forming on CNC machine-tool , Journal of Materials Processing Technology 162-163(2005) 622-628
- [16] J. Jeswiet,rapid proto-typing with incremental single point forming , CAD/CAM Comput.Grapics 15 (2000) 177-183
- [17] 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**  
**ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางเคมี**



MTEC NO.1858/54

## รายงานผลการวิเคราะห์

|                           |   |   |
|---------------------------|---|---|
| วันที่รายงาน              | : | 30 มีนาคม 2554  |
| ตัวอย่างจาก               | : | คุณ ชงชัย เพ็งจันทร์ดี<br>63 หมู่ 7 ต. องครักษ์ อ. องครักษ์ จ. นครนายก 26120<br>โทรศัพท์: 081 5578001                           |
| ทดสอบโดย                  | : | ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์<br>หน่วยวิจัยลักษณะเฉพาะของวัสดุ<br>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) |
|------|---|
|      | รังซีของเหลือ                           |
| 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                                   |
| รวม  | 100.00                                  |

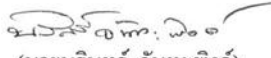
- Notes:**
1. ปริมาณของแต่ละธาตุที่รายงานข้างต้น ได้เทียบจากปริมาณรวมของธาตุที่พบด้วยเทคนิค XRF ทั้งหมดให้เป็น 100%
  2. ปริมาณของธาตุที่เครื่องมือสามารถวัดได้ต่ำสุดคือ 0.01 wt% นอกจากนี้จะแจ้งไว้นอกเหนือจากนั้น
  3. ข้อจำกัดทางเทคนิค XRF คือไม่สามารถวัดส่วนประกอบที่เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่าเลขอะตอมของออกซิเจน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

ข้อคิดเห็น: -

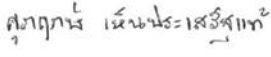
เอกสารแนบ:

เอกสารแนบที่ 1.1-1.2: กราฟแสดงองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง รังซีของเหลือ

ทดสอบโดย:

  
(นายรินทร์ จันทะพิงก์)  
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ XRD และ XRF

ตรวจสอบโดย:

  
(นายสุกฤษฎ์ เห็นประเสริฐแท้)  
รักษาราชการหัวหน้าห้องปฏิบัติการ XRD และ XRF

หมายเหตุ:

1. ศูนย์ฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของรายงาน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร จากศูนย์ฯ
2. ทางศูนย์ฯ ไม่สามารถรับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่จะเกิดขึ้น ไม่ว่าจะโดยทางตรงหรือทางอ้อม ในกรณีที่น่าข้อมูล ผลการวิเคราะห์ ข้อเสนอหรือคำแนะนำฉบับนี้ไปใช้ในการออกแบบ 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. Nalinthorn  
2. ....

Approved by

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

Examined by

S. Nalinthorn  
(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 :

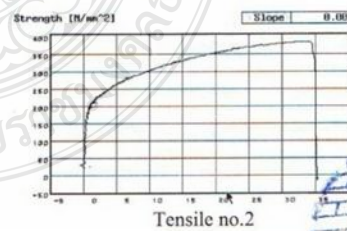
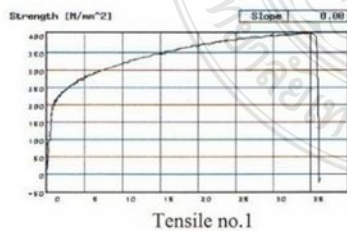
Test date : 4 May 2011

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 |



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

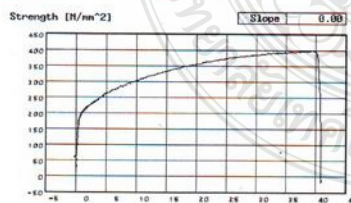
Test date : 4 May 2011

Test temperature : 25 °C

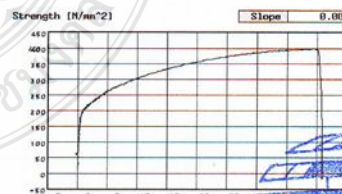
Testing machine : Electromechanical Universal Testing Machine SCHENCK RSA 250

**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

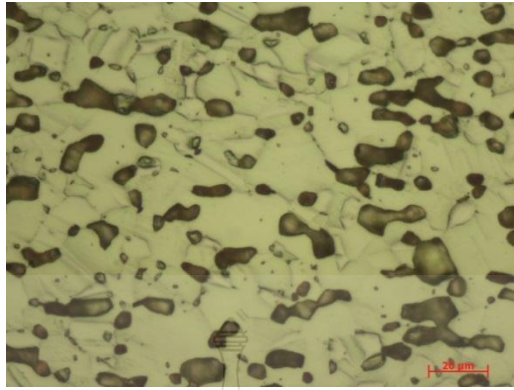
FS-MPAD-MDL-510-1-01/02/48

รูป ก.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของแผ่นทองเหลืองที่นำมาทำการทดลอง

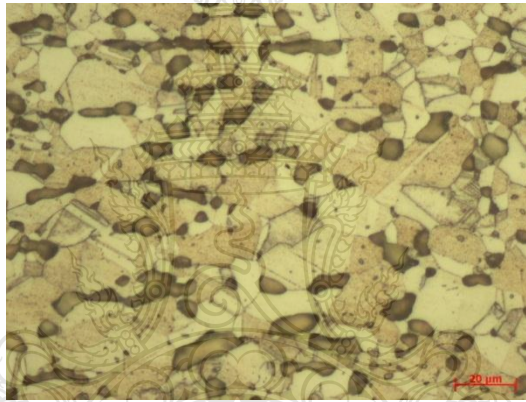


ภาคผนวก ข

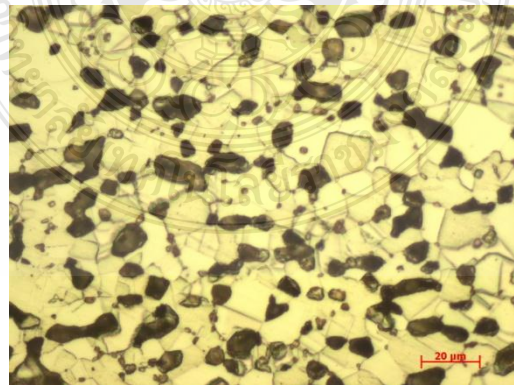
ภาพรวมโครงสร้างจุดภาคของทองเหลืองก่อนขึ้นรูป  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูป ข.1 ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่ 30x



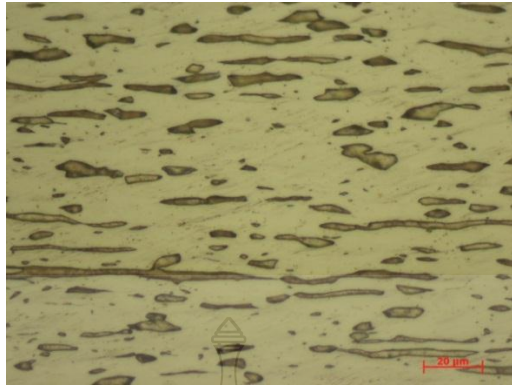
รูป ข.2 ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่ 40x



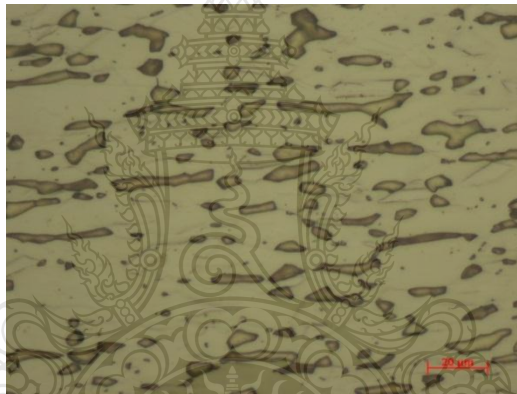
รูป ข.3 ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่ 50x

ภาคผนวก ค  
ภาพรวมโครงสร้างจุดภาคของทองเหลืองหลังขั้นรูป  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า

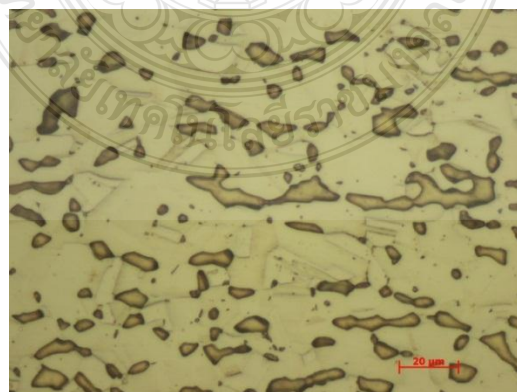




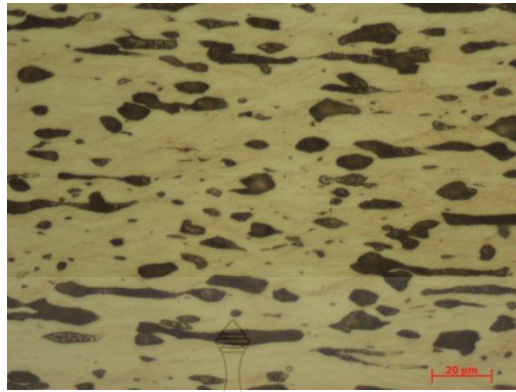
ชั้นที่ 1 มุมชันงาน 30° F 100 S 400 จุดที่ 1



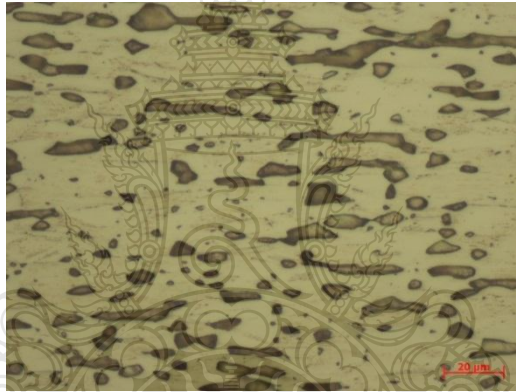
ชั้นที่ 1 มุมชันงาน 30° F 100 S 400 จุดที่ 2



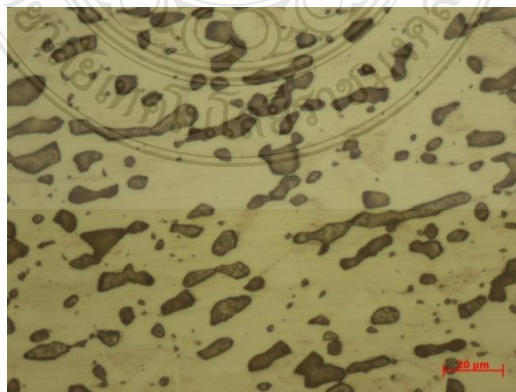
ชั้นที่ 1 มุมชันงาน 30° F 100 S 400 จุดที่ 3



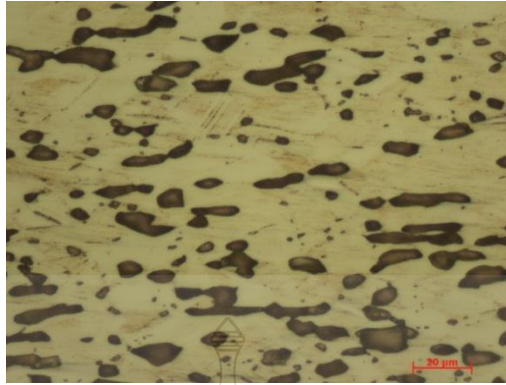
ชั้นที่ 2 มุมขึ้นงาน 30° F 100 S 200 จุดที่ 1



ชั้นที่ 2 มุมขึ้นงาน 30° F 100 S 200 จุดที่ 2



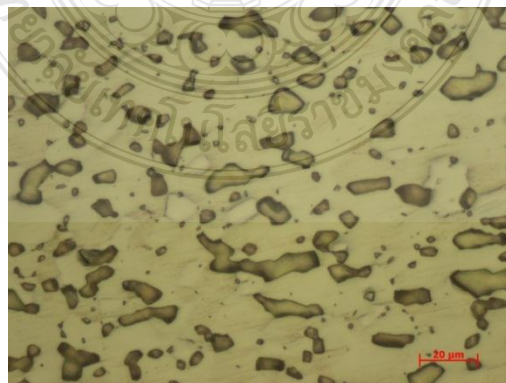
ชั้นที่ 2 มุมขึ้นงาน 30° F 100 S 200 จุดที่ 3



ชั้นที่ 3 มุมชันงาน 30° F 100 S 600 จุดที่ 1

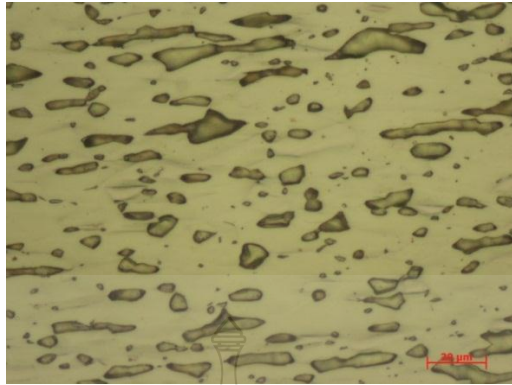


ชั้นที่ 3 มุมชันงาน 30° F 100 S 600 จุดที่ 2

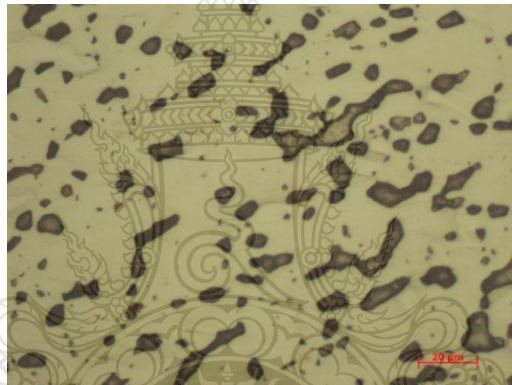


ชั้นที่ 3 มุมชันงาน 30° F 100 S 600 จุดที่ 3

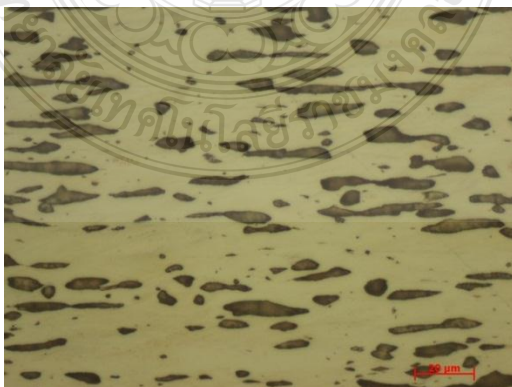




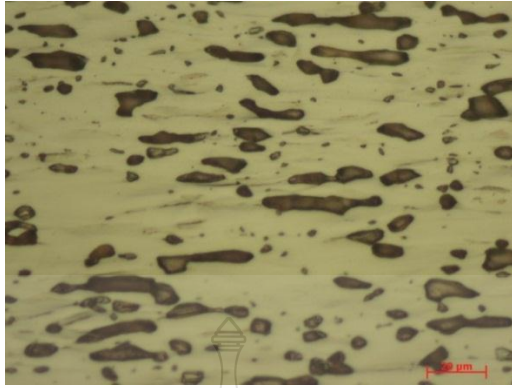
ชั้นที่ 4 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 200 จุดที่ 1



ชั้นที่ 4 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 200 จุดที่ 2



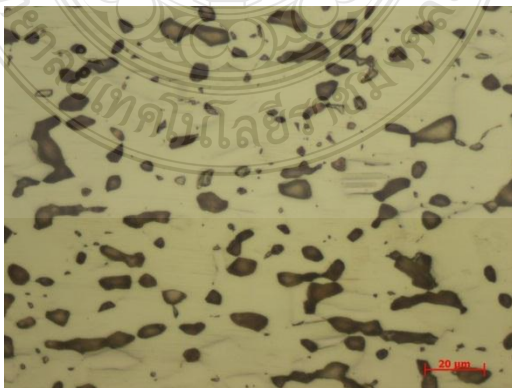
ชั้นที่ 4 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 200 จุดที่ 3



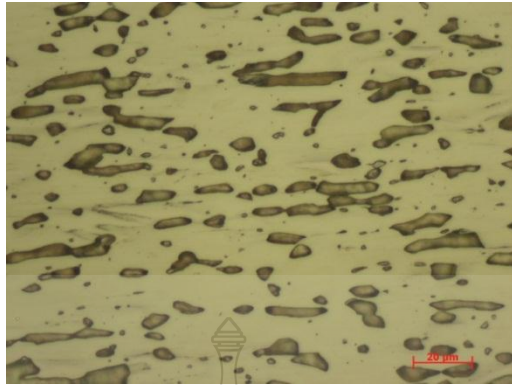
ชั้นที่ 5 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 400 จุดที่ 1



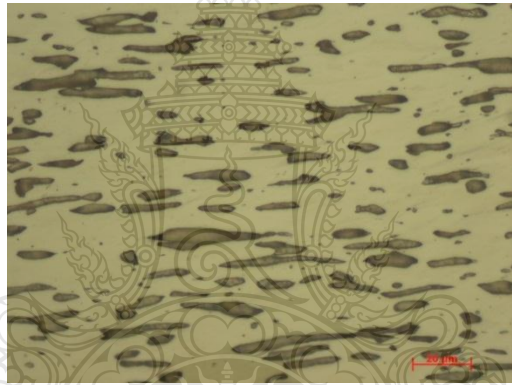
ชั้นที่ 5 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 400 จุดที่ 2



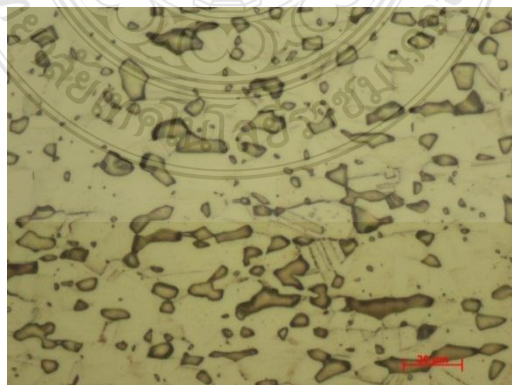
ชั้นที่ 5 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 400 จุดที่ 3



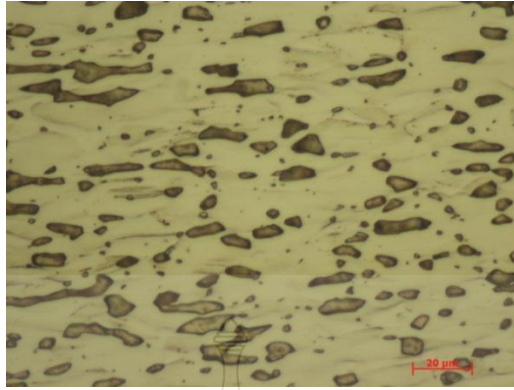
ชั้นที่ 6 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 600 จุดที่ 1



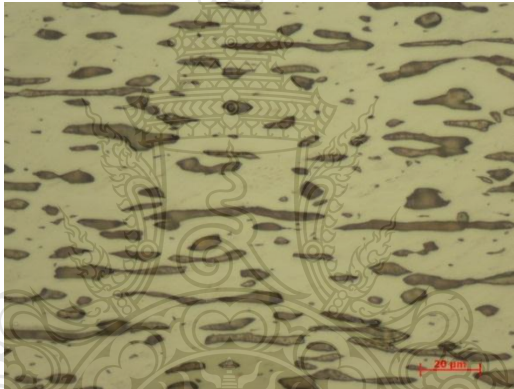
ชั้นที่ 6 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 600 จุดที่ 2



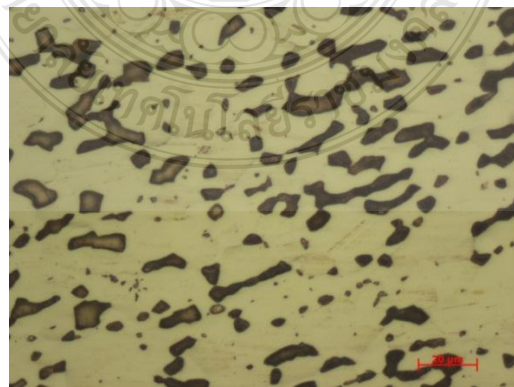
ชั้นที่ 6 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 600 จุดที่ 3



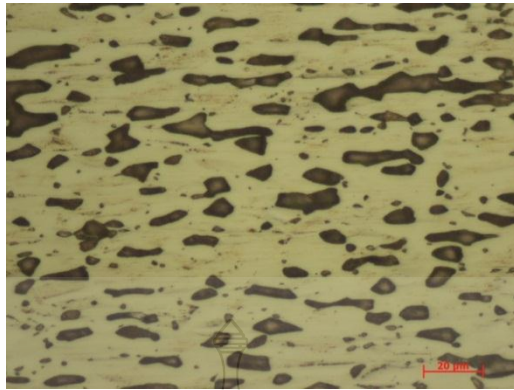
ชั้นที่ 7 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 400 จุดที่ 1



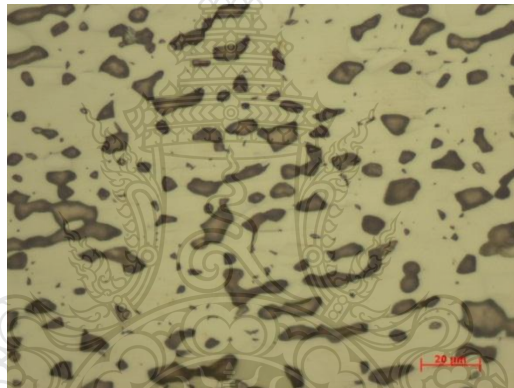
ชั้นที่ 7 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 400 จุดที่ 2



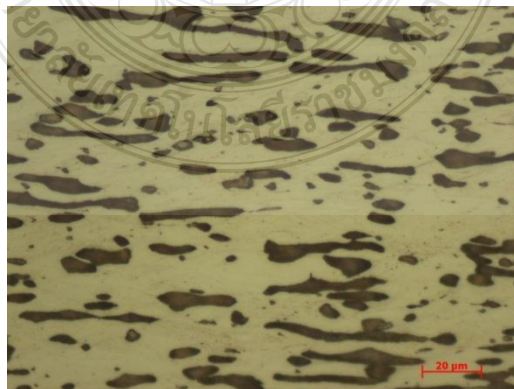
ชั้นที่ 7 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 400 จุดที่ 3



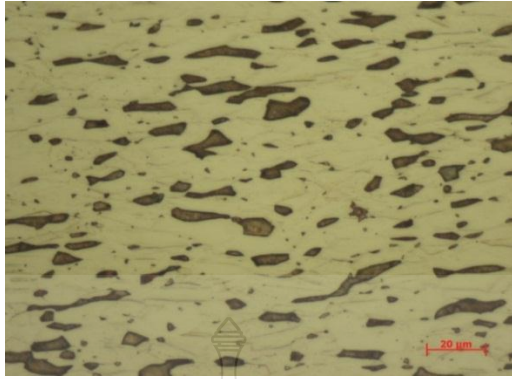
ชั้นที่ 8 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 300 จุดที่ 1



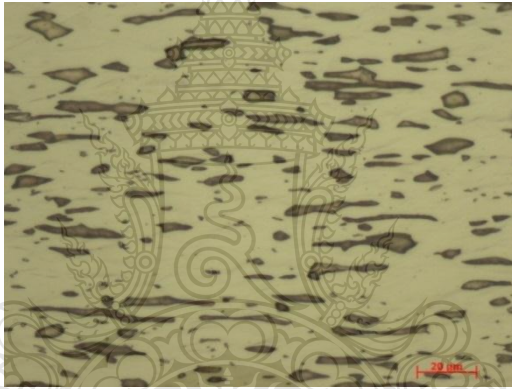
ชั้นที่ 8 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 300 จุดที่ 2



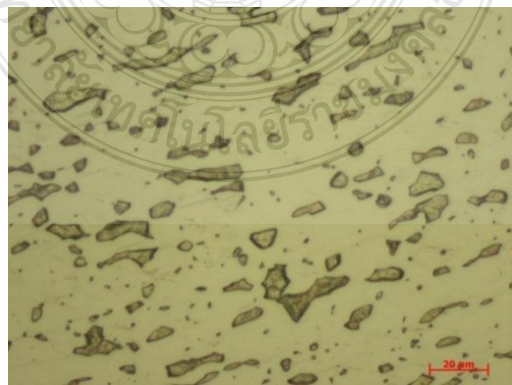
ชั้นที่ 8 มุมขึ้นงาน 30° F 200 S 300 จุดที่ 3



ชั้นที่ 9 มุมขึ้นงาน 30° F 300 S 600 จุดที่ 1

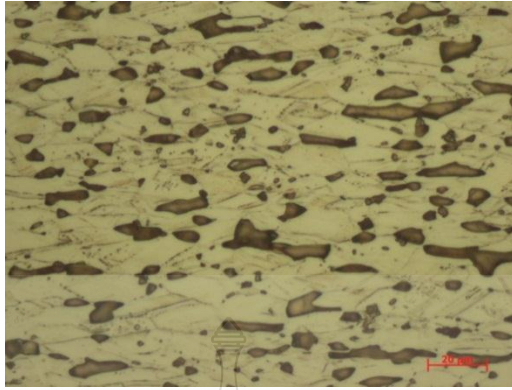


ชั้นที่ 9 มุมขึ้นงาน 30° F 300 S 600 จุดที่ 2

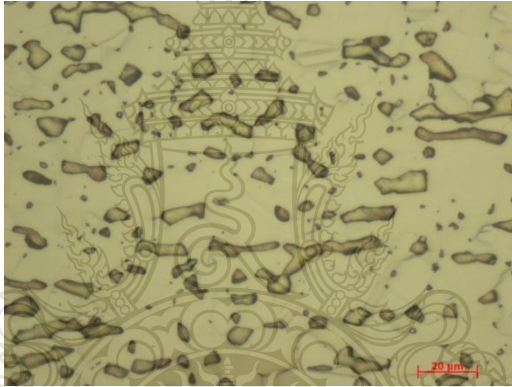


ชั้นที่ 9 มุมขึ้นงาน 30° F 300 S 600 จุดที่ 3

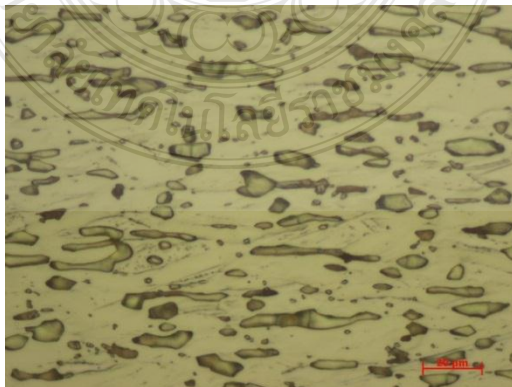
รูป ค.1 ภาพรวมโครงสร้างจุลภาคที่กำดั่งขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา



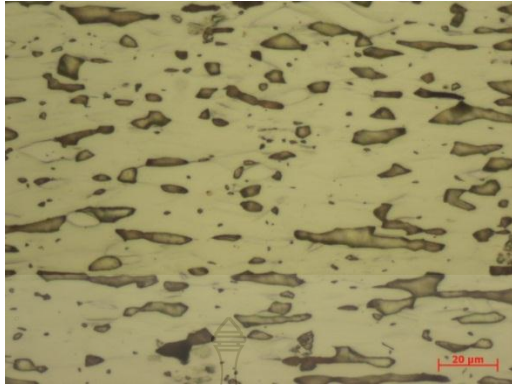
ชั้นที่ 10 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 300 จุดที่ 1



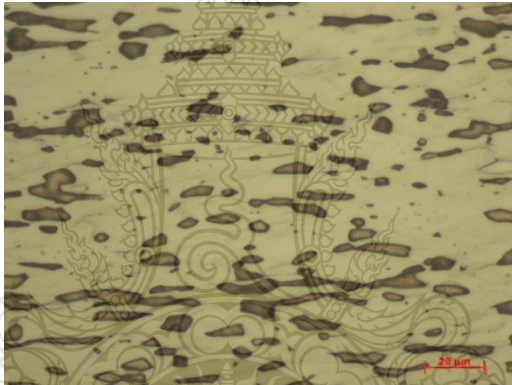
ชั้นที่ 10 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 300 จุดที่ 2



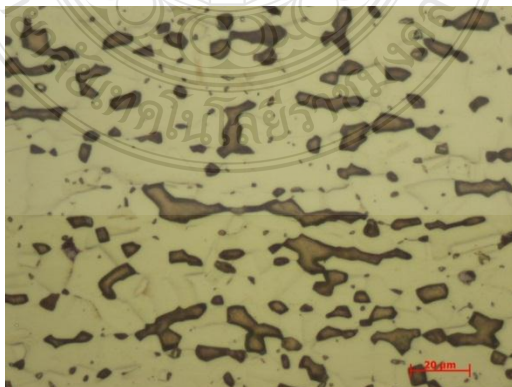
ชั้นที่ 10 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 300 จุดที่ 3



ชั้นที่ 11 มุมชิ้นงาน 40° F 300 S 600 จุดที่ 1

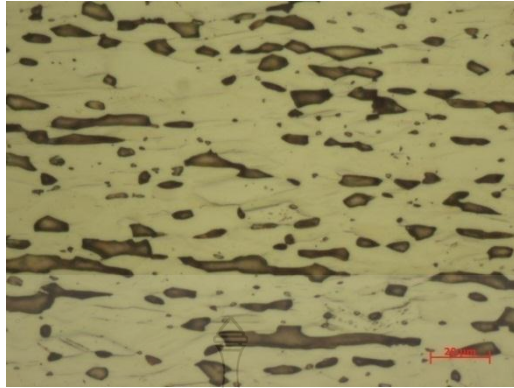


ชั้นที่ 11 มุมชิ้นงาน 40° F 300 S 600 จุดที่ 2

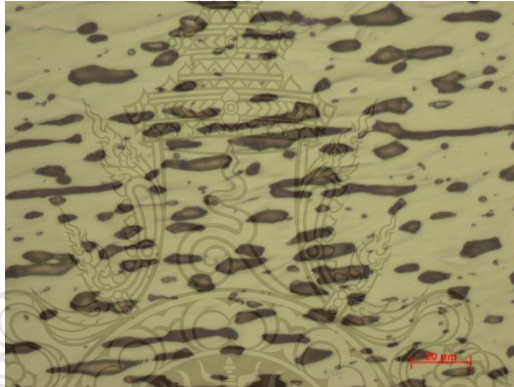


ชั้นที่ 11 มุมชิ้นงาน 40° F 300 S 600 จุดที่ 3

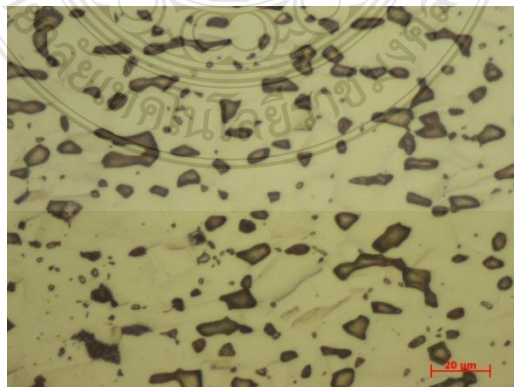




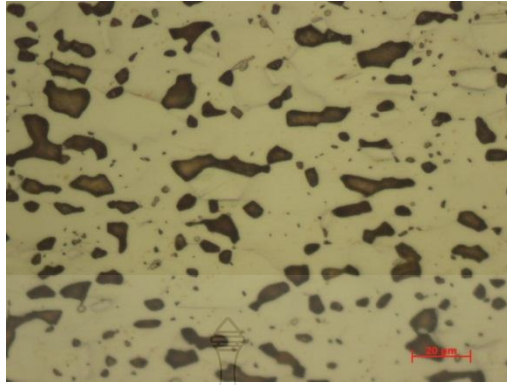
ชั้นที่ 12 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 600 จุดที่ 1



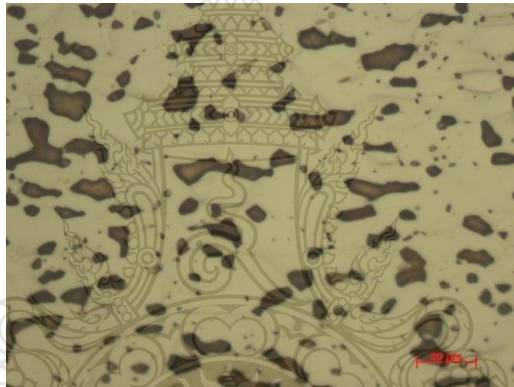
ชั้นที่ 12 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 600 จุดที่ 2



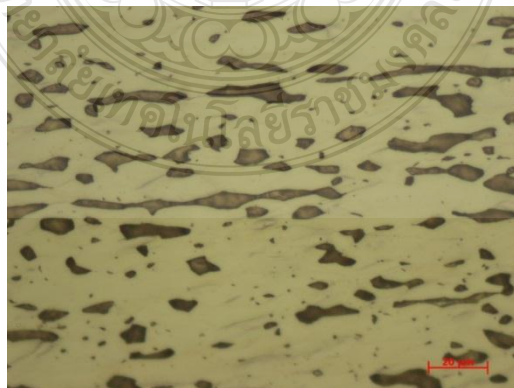
ชั้นที่ 12 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 600 จุดที่ 3



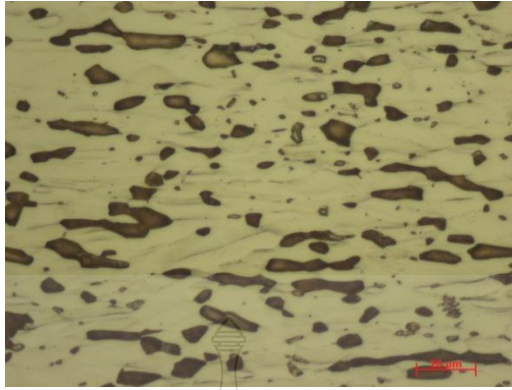
ชั้นที่ 13 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 200 จุดที่ 1



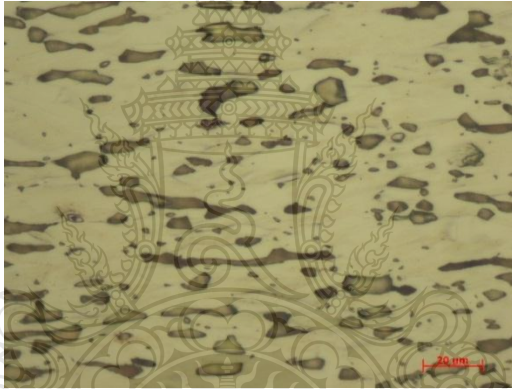
ชั้นที่ 13 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 200 จุดที่ 2



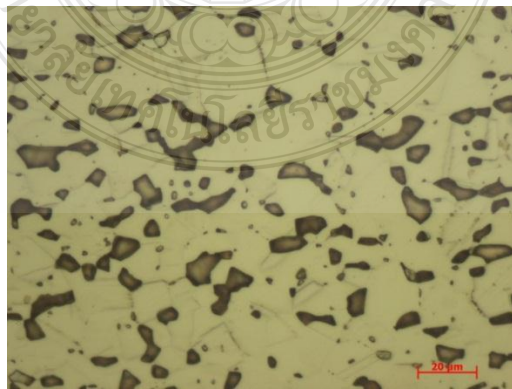
ชั้นที่ 13 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 200 จุดที่ 3



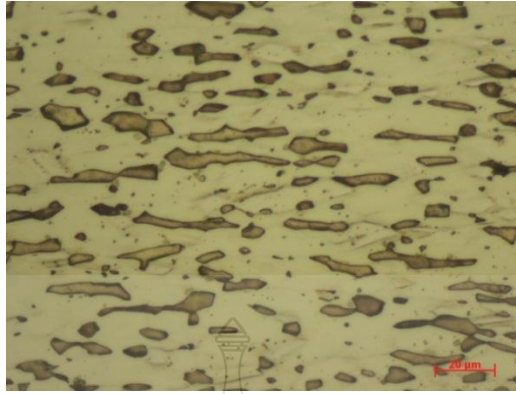
ชั้นที่ 14 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 400 จุดที่ 1



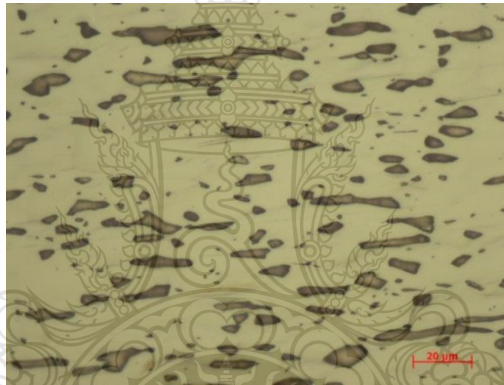
ชั้นที่ 14 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 400 จุดที่ 2



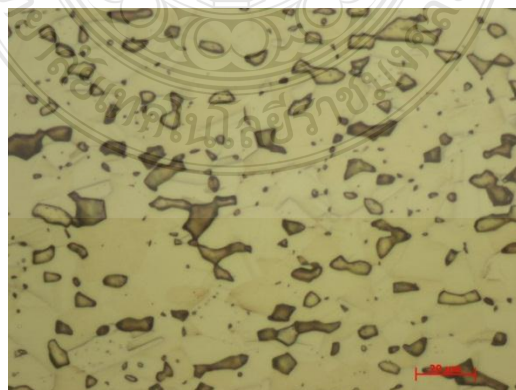
ชั้นที่ 14 มุมขึ้นงาน 40° F 200 S 400 จุดที่ 3



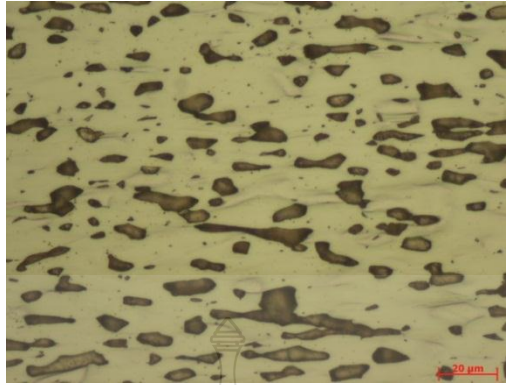
ชั้นที่ 15 มุมชิ้นงาน 40° F 100 S 600 จุดที่ 1



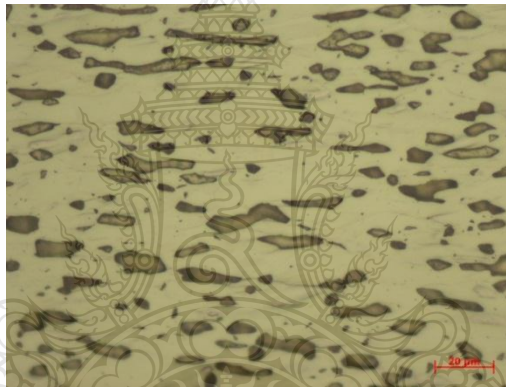
ชั้นที่ 15 มุมชิ้นงาน 40° F 100 S 600 จุดที่ 2



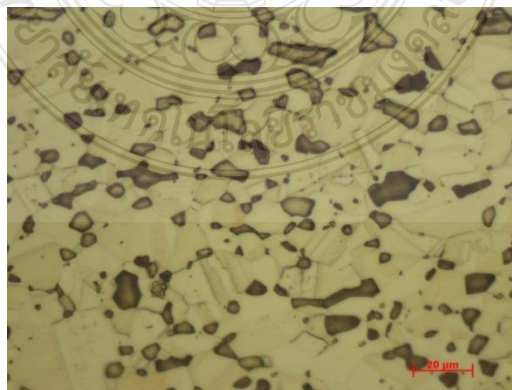
ชั้นที่ 15 มุมชิ้นงาน 40° F 100 S 600 จุดที่ 3



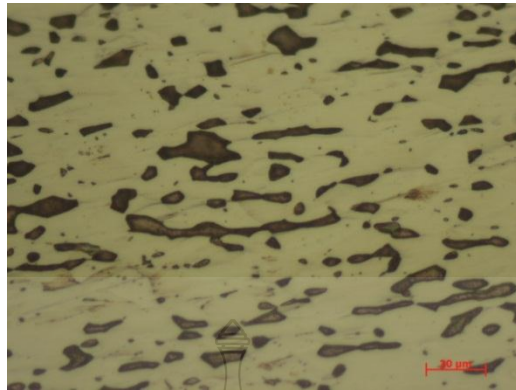
ชั้นที่ 16 มุมขึ้นงาน 40° F 100 S 400 จุดที่ 1



ชั้นที่ 16 มุมขึ้นงาน 40° F 100 S 400 จุดที่ 2



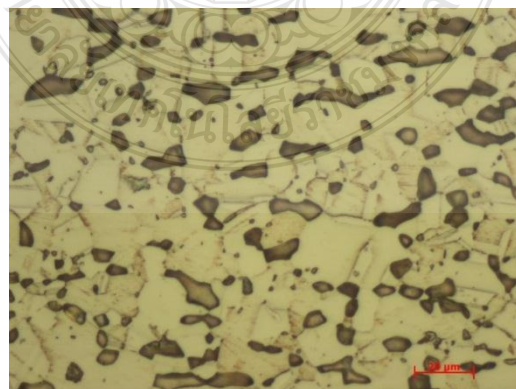
ชั้นที่ 16 มุมขึ้นงาน 40° F 100 S 400 จุดที่ 3



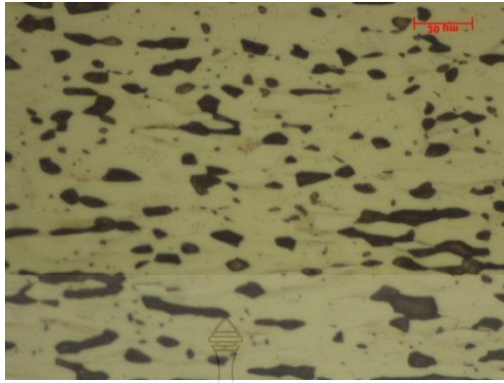
ชั้นที่ 17 มุมชันงาน 40° F 300 S 400 จุดที่ 1



ชั้นที่ 17 มุมชันงาน 40° F 300 S 400 จุดที่ 2



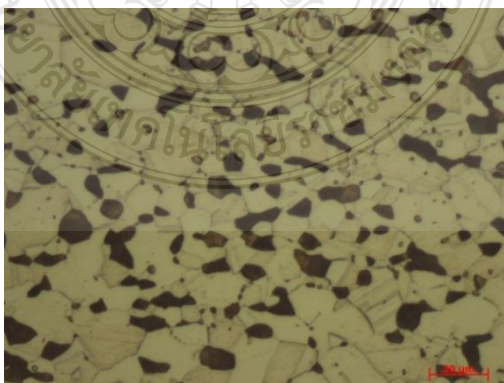
ชั้นที่ 17 มุมชันงาน 40° F 300 S 400 จุดที่ 3



ชั้นที่ 18 มุมชันงาน 40° F 100 S 200 จุดที่ 1

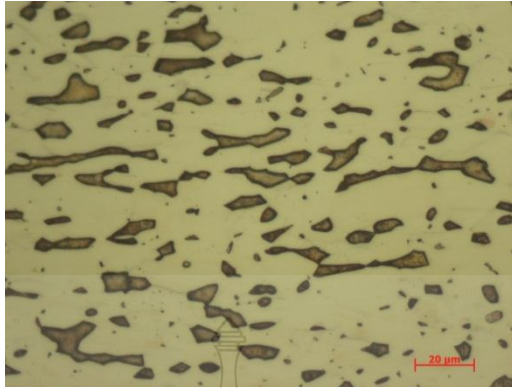


ชั้นที่ 18 มุมชันงาน 40° F 100 S 200 จุดที่ 2

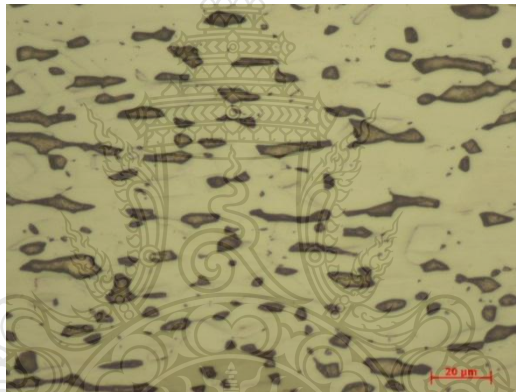


ชั้นที่ 18 มุมชันงาน 40° F 100 S 200 จุดที่ 3

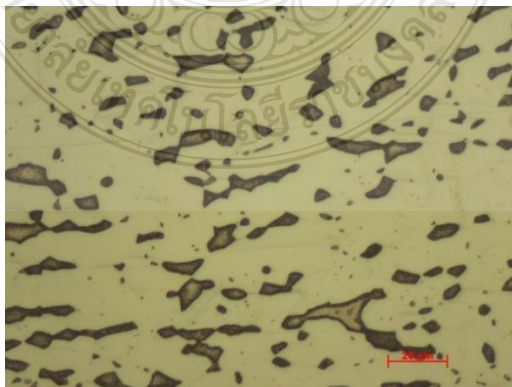
รูป ค.2 ภาพรวมโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา



ชั้นที่ 19 มุมชันงาน 50° F 100 S 200 จุดที่ 1

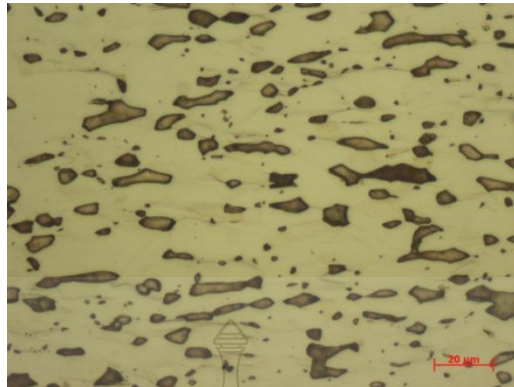


ชั้นที่ 19 มุมชันงาน 50° F 100 S 200 จุดที่ 2

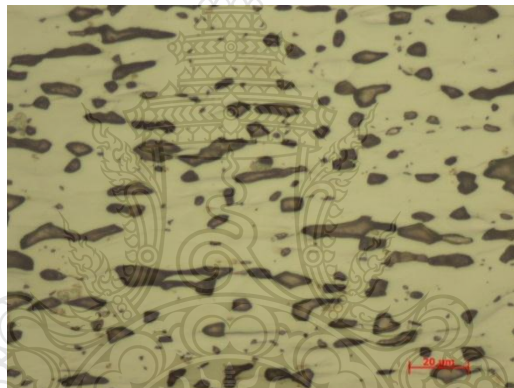


ชั้นที่ 19 มุมชันงาน 50° F 100 S 200 จุดที่ 3





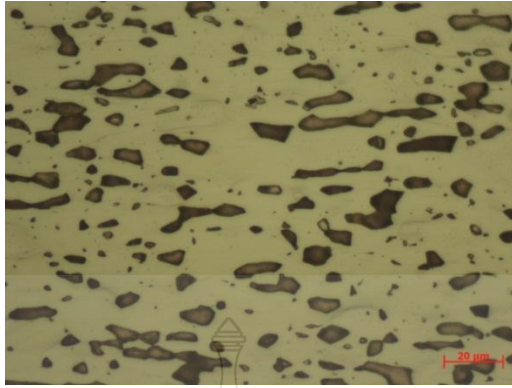
ชั้นที่ 20 มุมชันงาน 50° F 100 S 400 จุดที่ 1



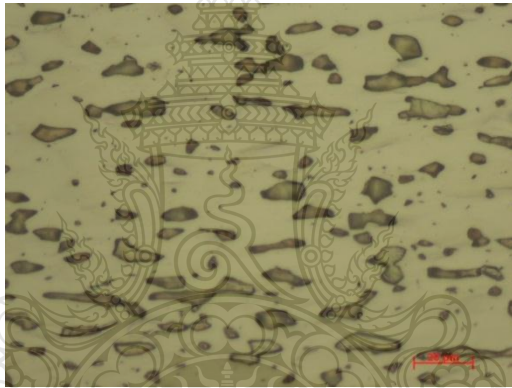
ชั้นที่ 20 มุมชันงาน 50° F 100 S 400 จุดที่ 2



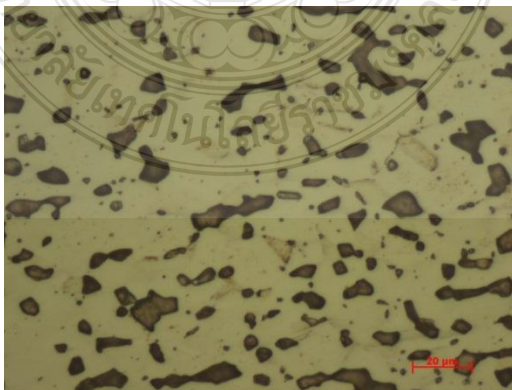
ชั้นที่ 20 มุมชันงาน 50° F 100 S 400 จุดที่ 3



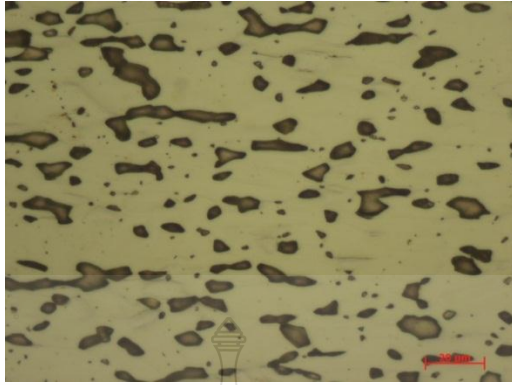
ชั้นที่ 21 มุมขึ้นงาน 50° F 100 S 600 จุดที่ 1



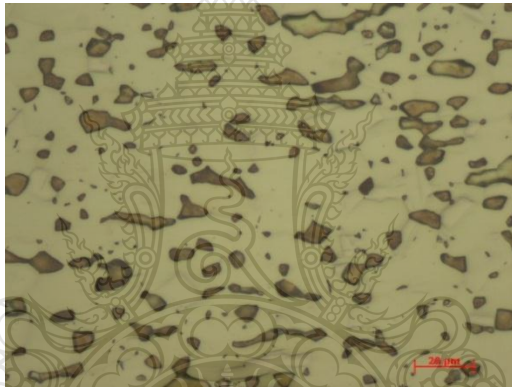
ชั้นที่ 21 มุมขึ้นงาน 50° F 100 S 600 จุดที่ 2



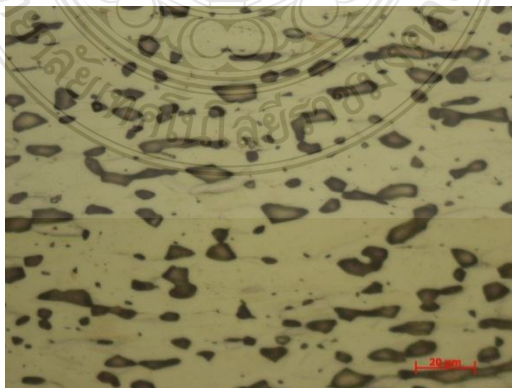
ชั้นที่ 21 มุมขึ้นงาน 50° F 100 S 600 จุดที่ 3



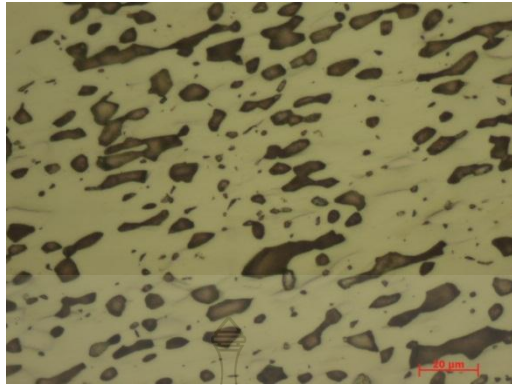
ชั้นที่ 22 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 200 จุดที่ 1



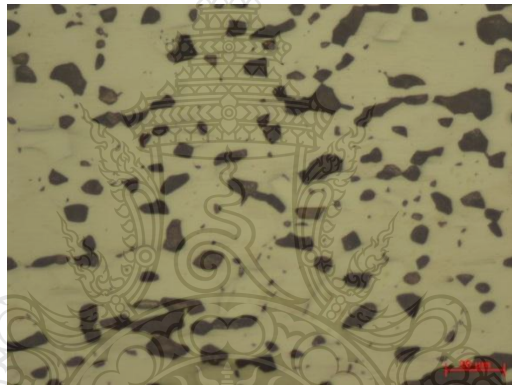
ชั้นที่ 22 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 200 จุดที่ 2



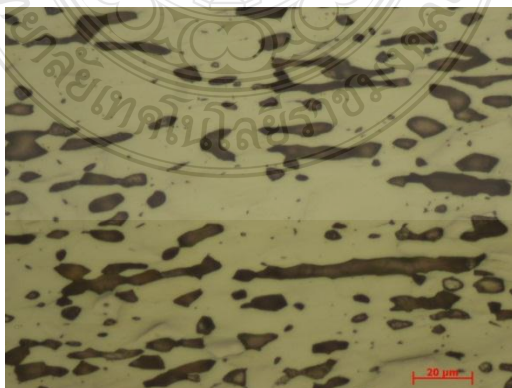
ชั้นที่ 22 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 200 จุดที่ 3



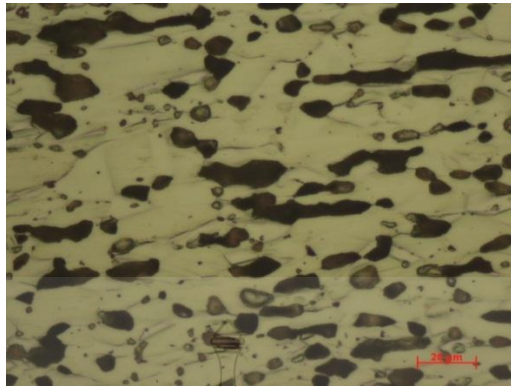
ชั้นที่ 23 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 300 จุดที่ 1



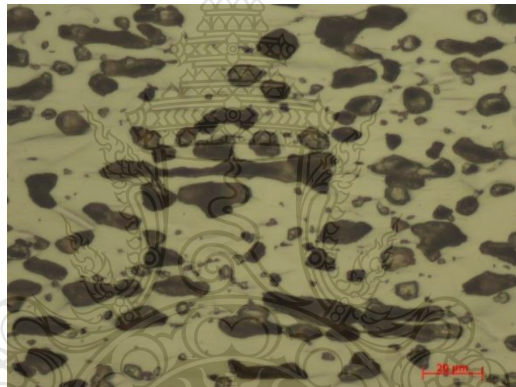
ชั้นที่ 23 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 300 จุดที่ 2



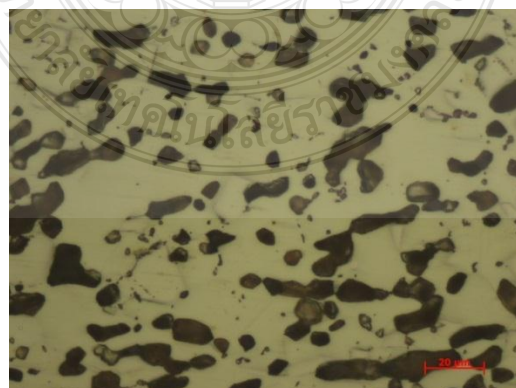
ชั้นที่ 23 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 300 จุดที่ 3



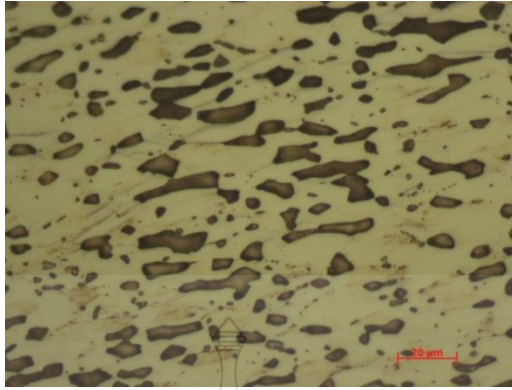
ชั้นที่ 24 มุมชิ้นงาน 50° F 300 S 600 จุดที่ 1



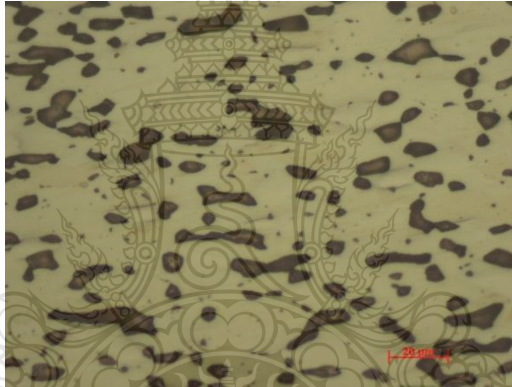
ชั้นที่ 24 มุมชิ้นงาน 50° F 300 S 600 จุดที่ 2



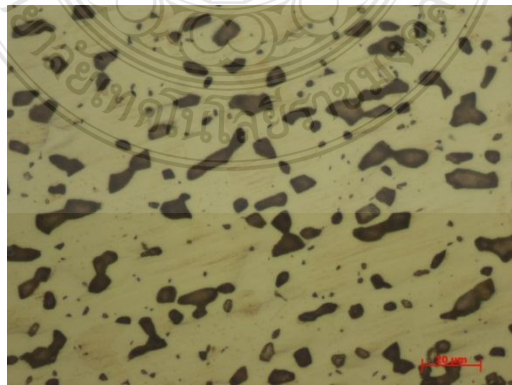
ชั้นที่ 24 มุมชิ้นงาน 50° F 300 S 600 จุดที่ 3



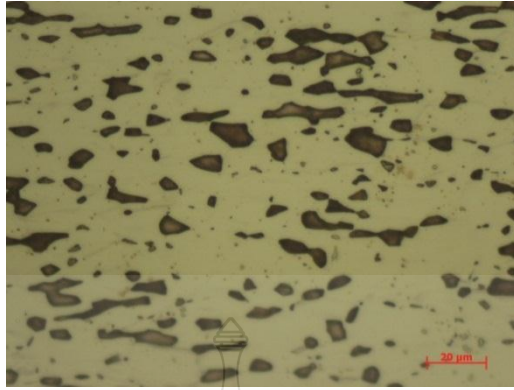
ชั้นที่ 25 มุมขึ้นงาน 50° F 300 S 400 จุดที่ 1



ชั้นที่ 25 มุมขึ้นงาน 50° F 300 S 400 จุดที่ 2



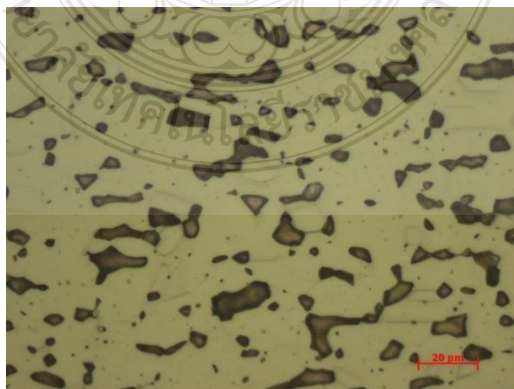
ชั้นที่ 25 มุมขึ้นงาน 50° F 300 S 400 จุดที่ 3



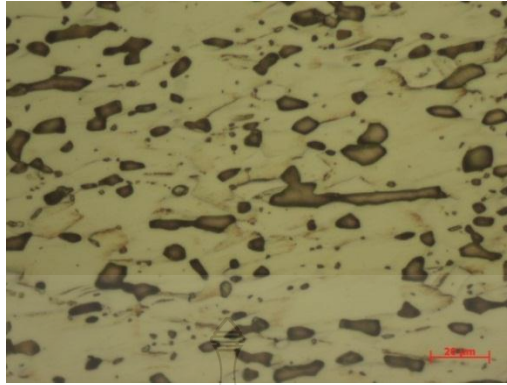
ชั้นที่ 26 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 400 จุดที่ 1



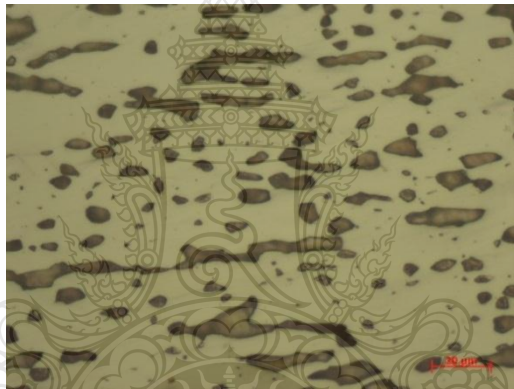
ชั้นที่ 26 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 400 จุดที่ 2



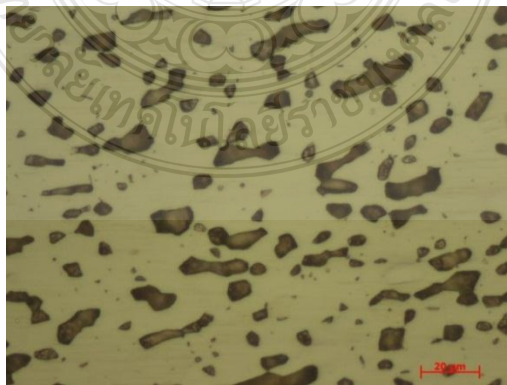
ชั้นที่ 26 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 400 จุดที่ 3



ชั้นที่ 27 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 600 จุดที่ 1



ชั้นที่ 27 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 600 จุดที่ 2



ชั้นที่ 27 มุมขึ้นงาน 50° F 200 S 600 จุดที่ 3

รูป ค.3 ภาพรวมโครงสร้างจุดภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา





## Grains - Chord Report



### Sample Data

Date and Time: 15.01.2013 16:20  
 Job Number: normal  
 Number: 30-100-600  
 Description:

### Scaling

Name: 50X.zvso  
 X: 0.125313  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$   
 Y: 0.125313  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$

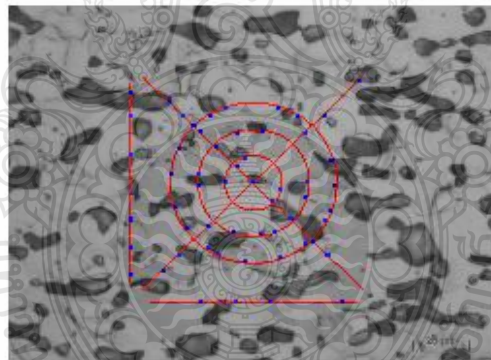
### Image Source

Source Name: Folder Image Source  
 Image Path: C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop  
 Extension: \*  
 Search Path: \*  
 Automatic: No

### Measurement

Snapshot 1

Size 9.29



Output Image

### Totals

Size 9.29

### Responsible Persons

Evaluated By:  
 Checked By:

รูป ง.1 ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 30 องศา

## Grains - Chord Report



### Sample Data

Date and Time: 15.01.2013 16:28  
 Job Number: normal  
 Number: 40-300-200  
 Description:

### Scaling

Name: 50X.zvso  
 X: 0.125313  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$   
 Y: 0.125313  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$

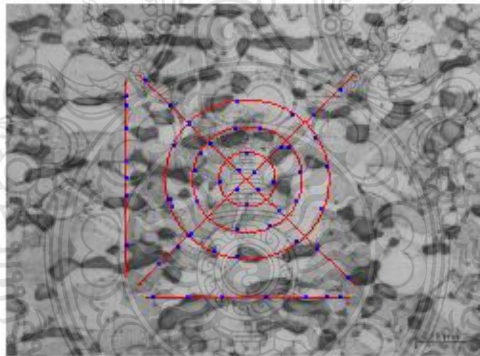
### Image Source

Source Name: Folder Image Source  
 Image Path: C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop  
 Extension: \*  
 Search Path: \*  
 Automatic: No

### Measurement

Snapshot 1

Size 9.29



### Totals

Size 9.29

### Responsible Persons

Evaluated By:  
 Checked By:

รูป ง.2 ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 40 องศา

## Grains - Chord Report



### Sample Data

Date and Time: 15.01.2013 16:32  
 Job Number: normal  
 Number: 50-300-600  
 Description:

### Scaling

Name: 50X.zvso  
 X: 0.125313  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$   
 Y: 0.125313  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$

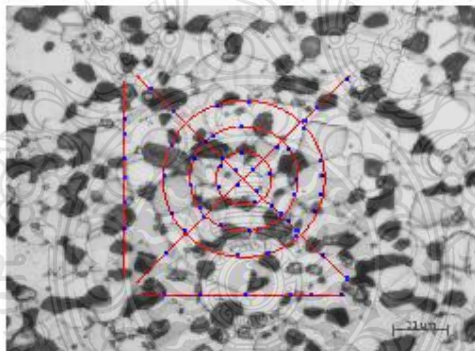
### Image Source

Source Name: Folder Image Source  
 Image Path: C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop  
 Extension: \*  
 Search Path: \*  
 Automatic: No

### Measurement

#### Snapshot 1

Size 9.48



Output Image

### Totals

Size 9.48

### Responsible Persons

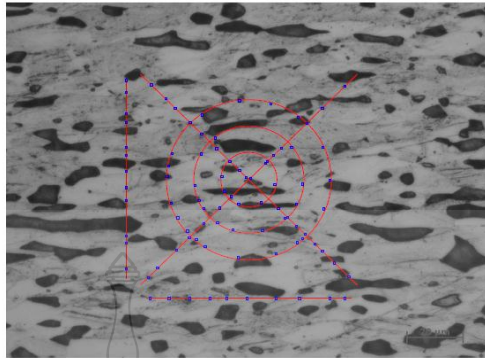
Evaluated By:  
 Checked By:

รูป ง.3 ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่ค่าถังขยาย 500 เท่า ที่มุม 50 องศา



Snapshot 1

Size 10.61

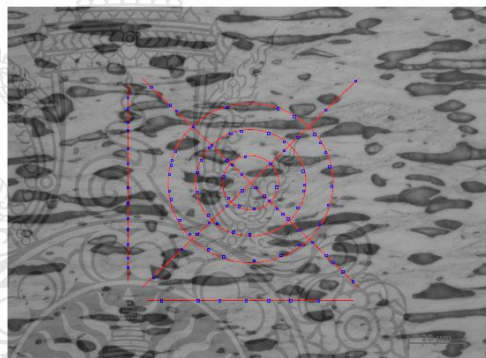


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.79

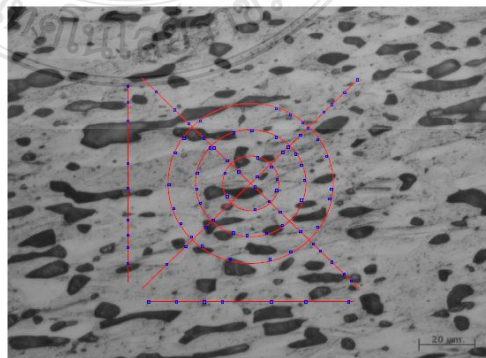


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.48

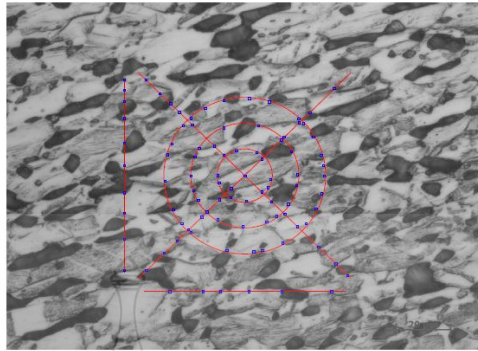


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 3

Snapshot 1

Size 10.70

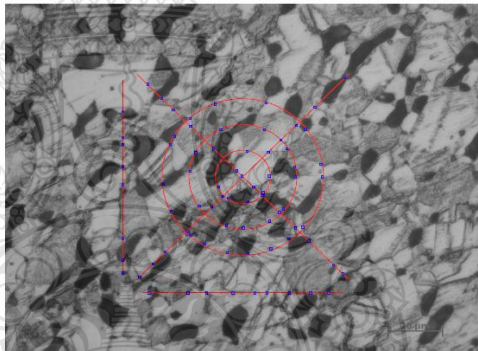


Output Image

ชั้นที่2 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.16

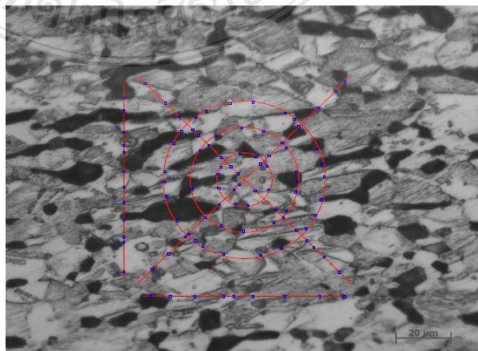


Output Image

ชั้นที่2 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.85

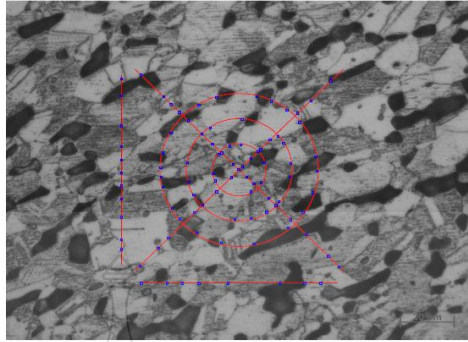


Output Image

ชั้นที่2 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 3

Snapshot 1

Size 10.73

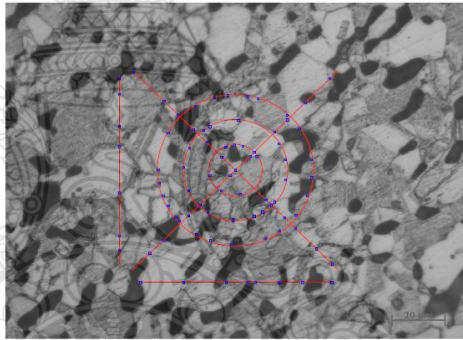


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.37

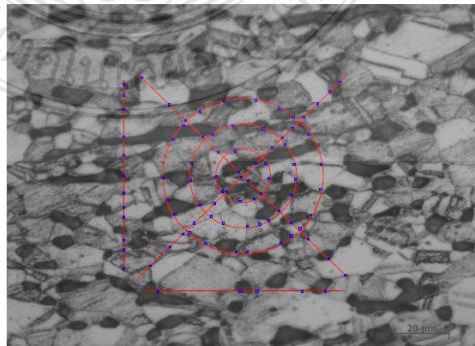


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.54



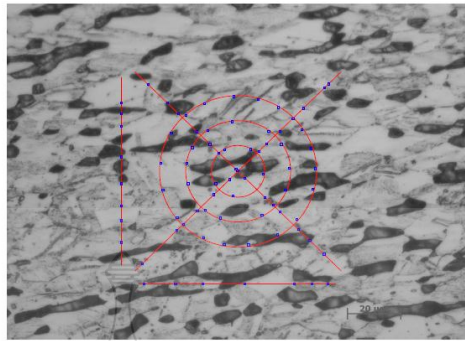
Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 3



Snapshot 2

Size 10.19

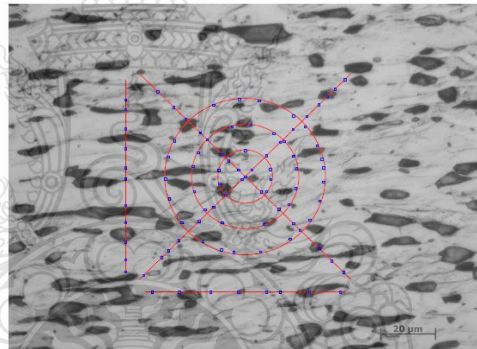


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.70

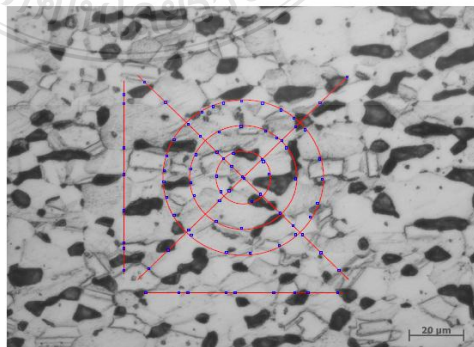


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 3

Size 10.37

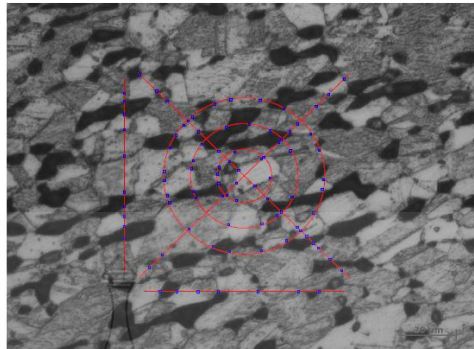


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 3

Snapshot 1

Size 10.61

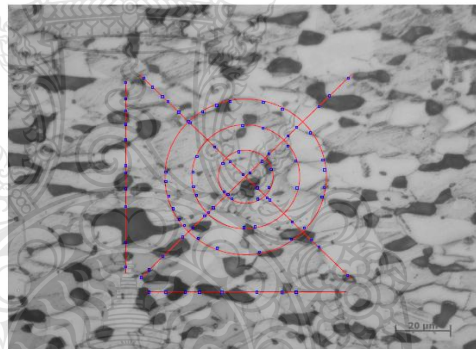


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.67

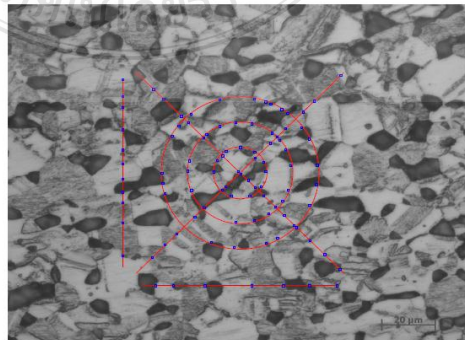


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.82

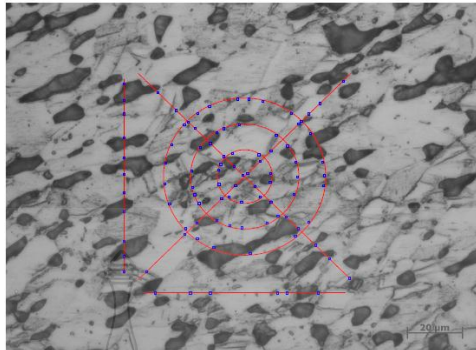


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.73

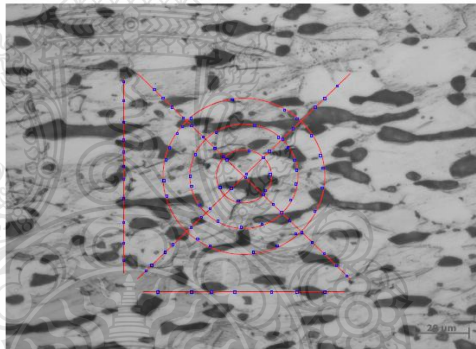


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.70

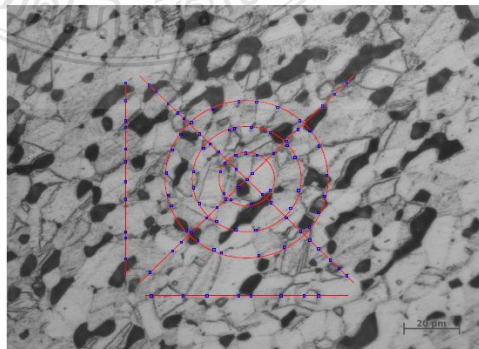


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.91

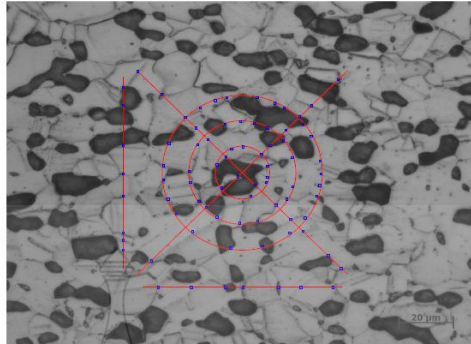


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 400 จุดที่ 3

Snapshot 1

Size 10.30

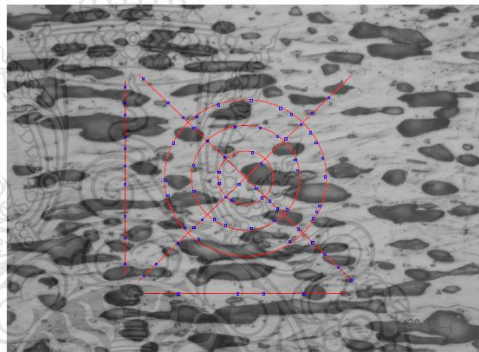


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.08

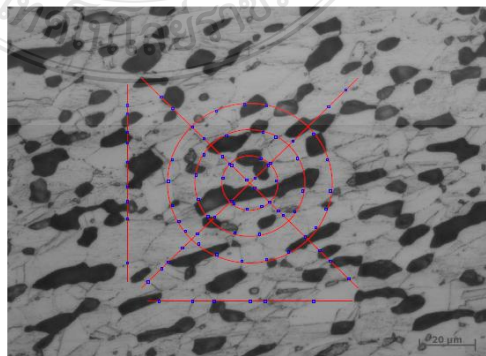


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.27

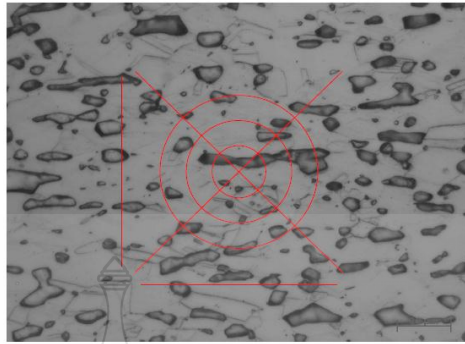


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

Snapshot 1

Size 10.44



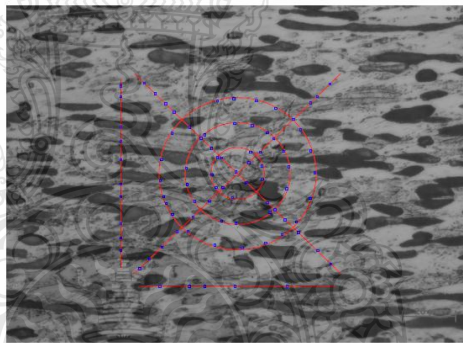
Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

### Measurement

Snapshot 1

Size 10.44

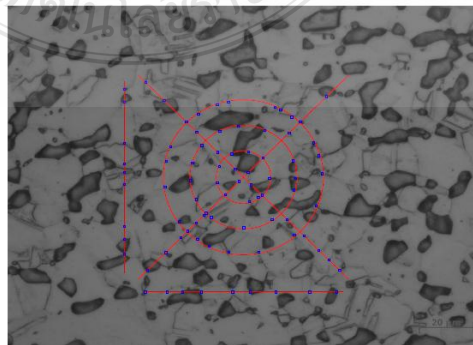


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.41

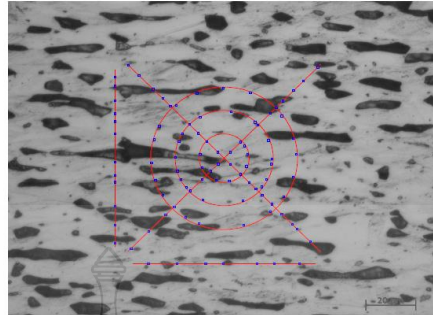


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 10.79

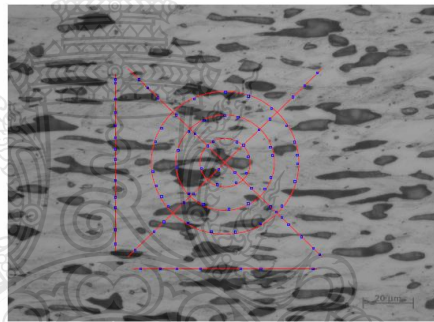


Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 2

Size 10.54

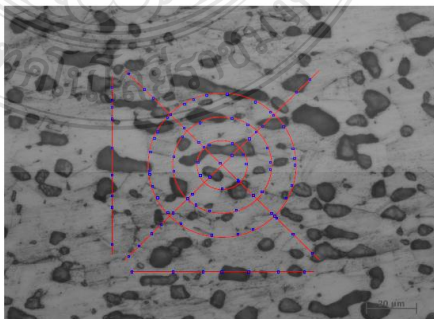


Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.70



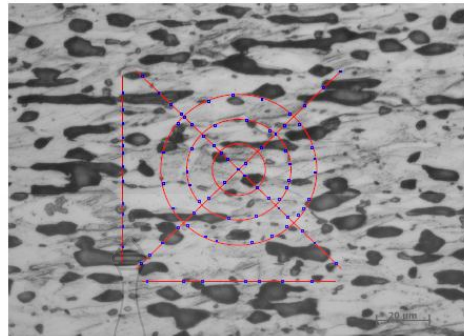
Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 30, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

รูป จ.1 ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 30 องศา

Snapshot 3

Size 10.51

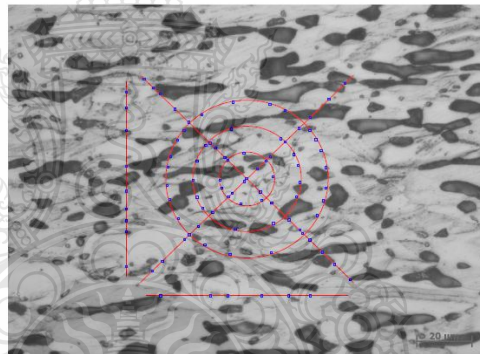


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.64

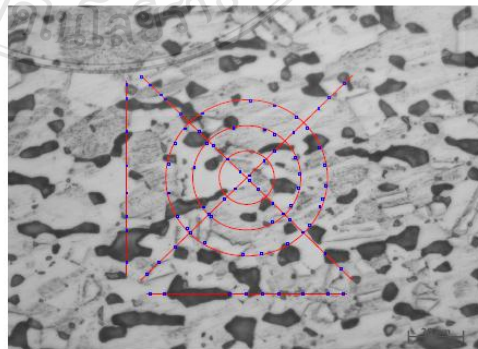


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.30

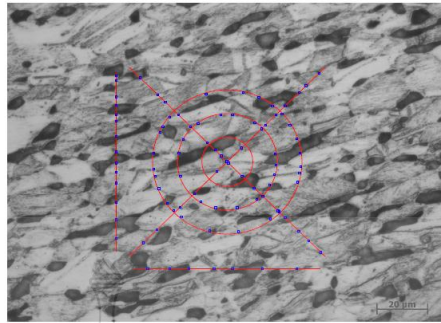


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 10.67

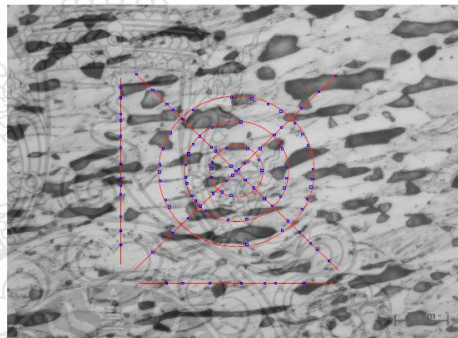


Output Image

ชั้นที่ 2 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 2

Size 10.97

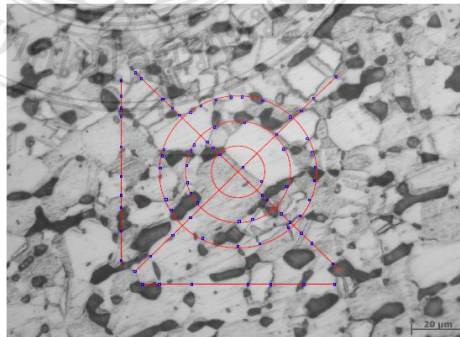


Output Image

ชั้นที่ 2 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.12



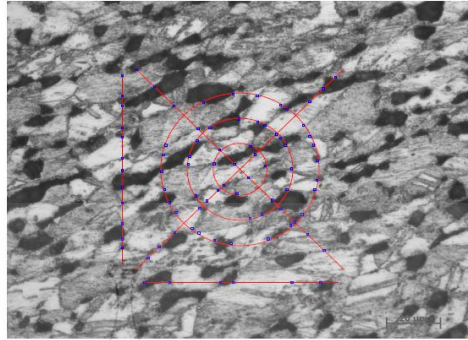
Output Image

ชั้นที่ 2 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 3



Snapshot 3

Size 10.41

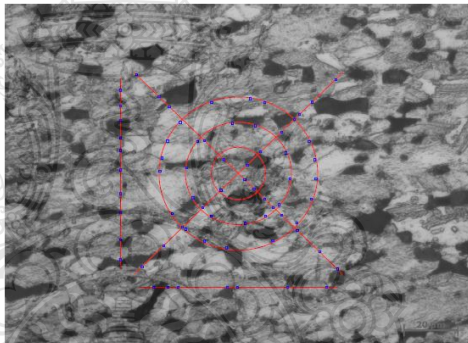


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 2

Size 9.88

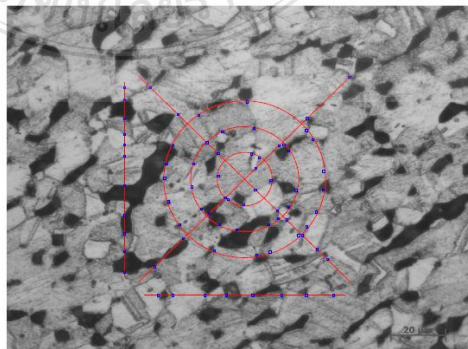


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.00

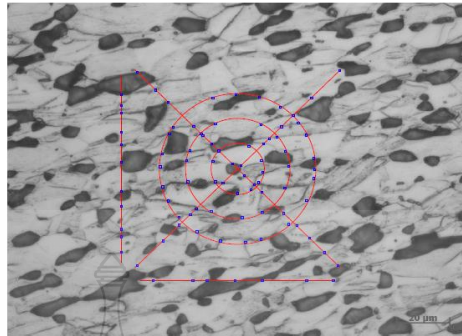


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 10.61

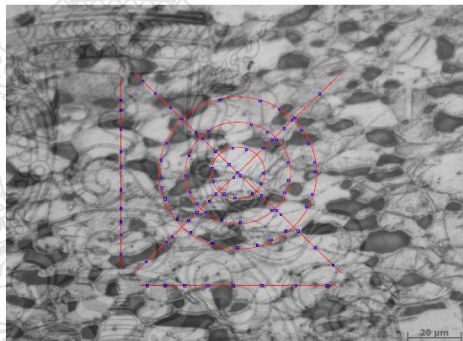


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.70

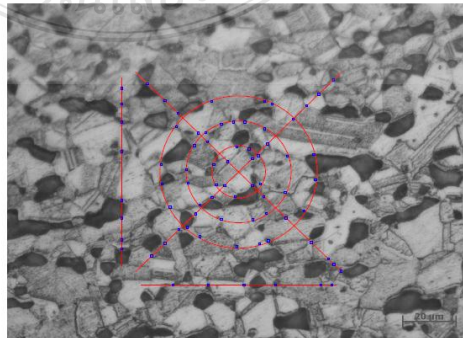


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.08

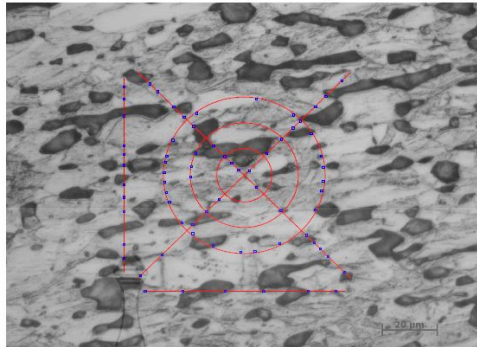


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 9.92

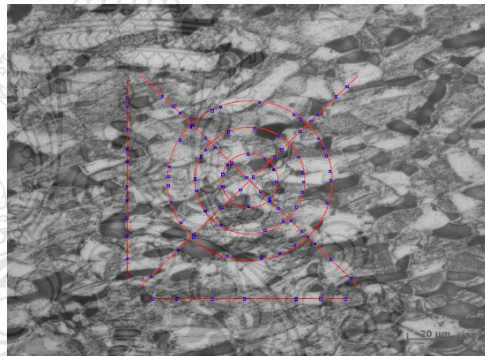


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.76

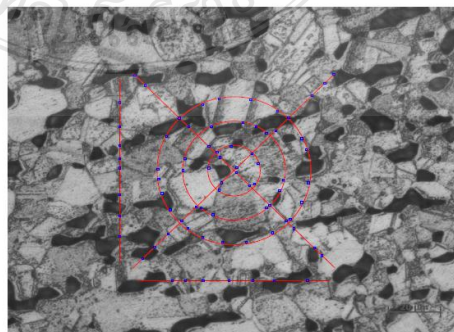


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.16

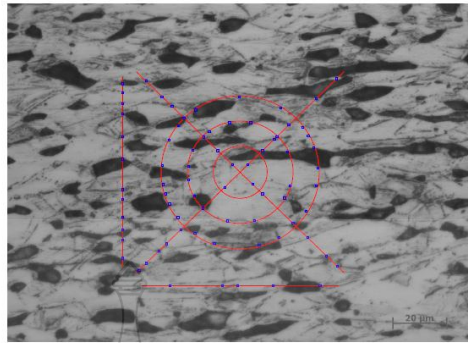


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 10.12

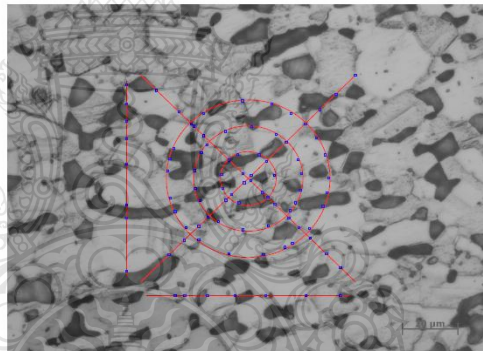


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 400, ความเร็ว 300 จุดที่ 1

Snapshot 2

Size 10.54

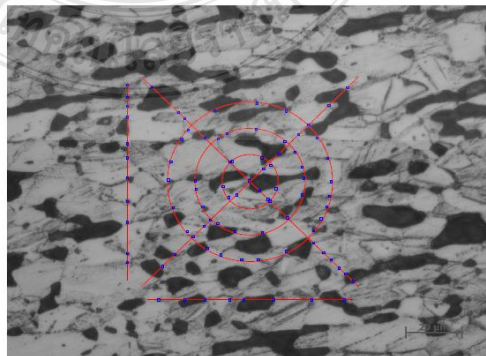


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 400, ความเร็ว 300 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.54

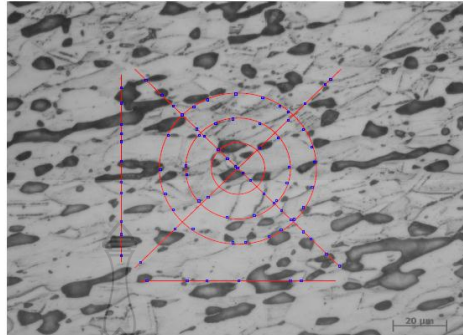


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 400, ความเร็ว 300 จุดที่ 3

Snapshot 2

Size 10.23

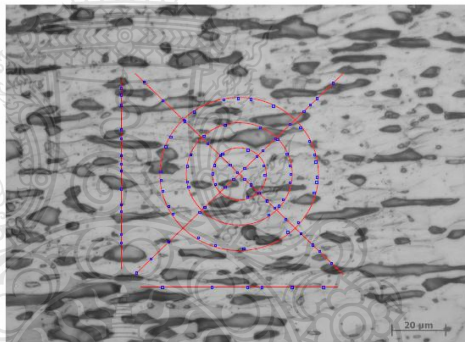


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.91

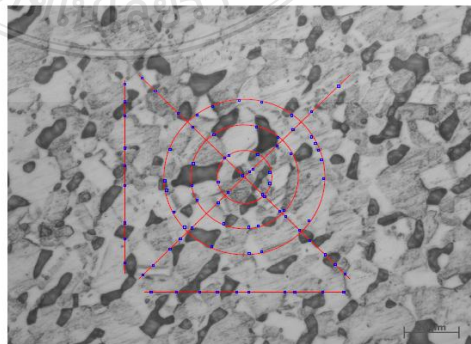


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 3

Size 10.34

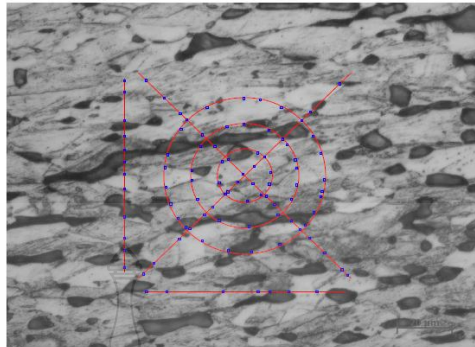


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

Snapshot 2

Size 10.76

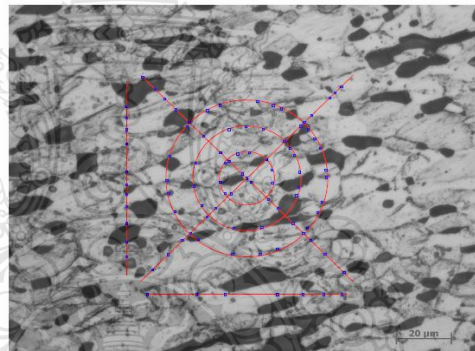


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.70

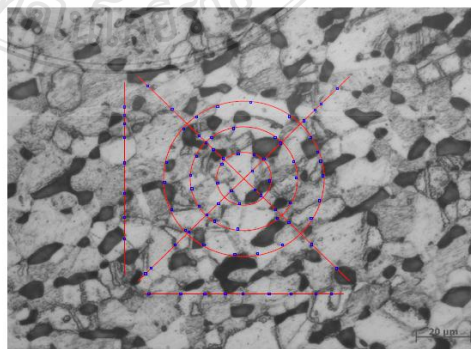


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 3

Size 10.30

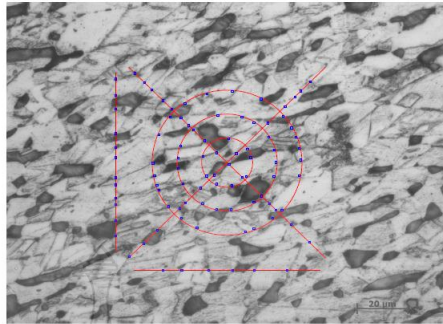


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

Snapshot 2

Size 10.73

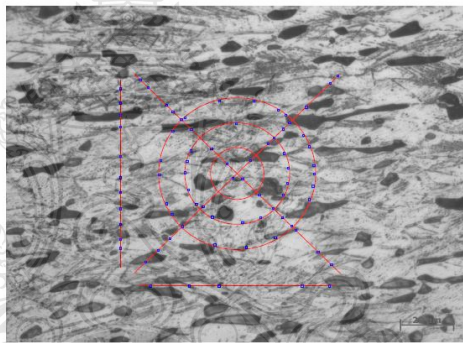


Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.19

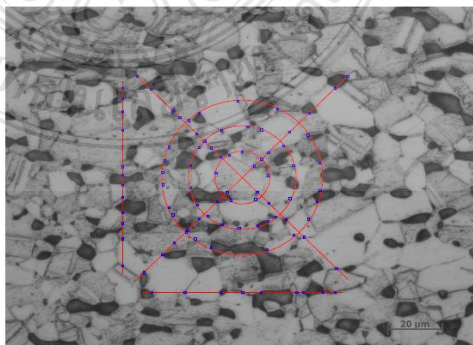


Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 3

Size 10.61



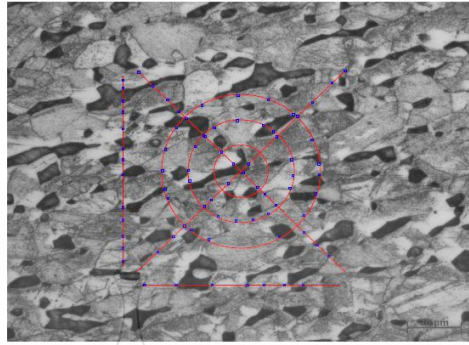
Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 40, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

รูป จ.2 ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่ค่าสังขยา 500 เท่า ที่มุม 40 องศา

Snapshot 3

Size 10.23

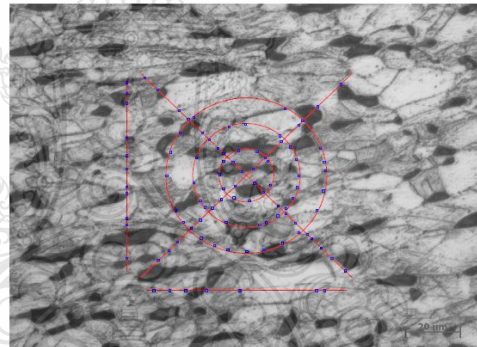


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.85

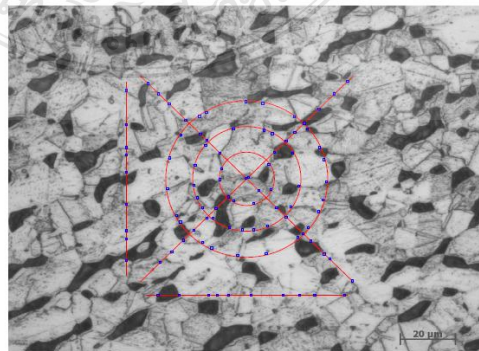


Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.73



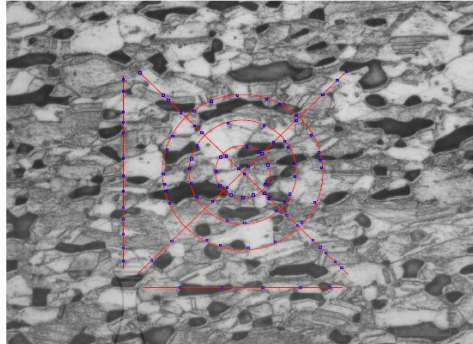
Output Image

ชั้นที่ 1 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 200 จุดที่ 3



Snapshot 3

Size 10.76

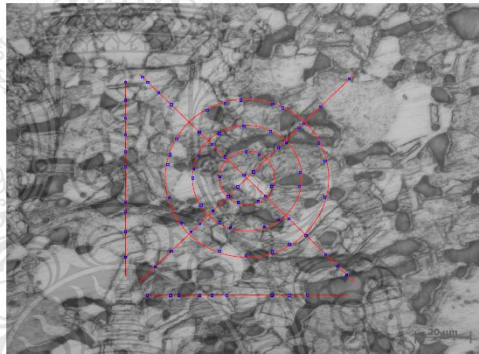


Output Image

ชั้นที่ 2 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.37

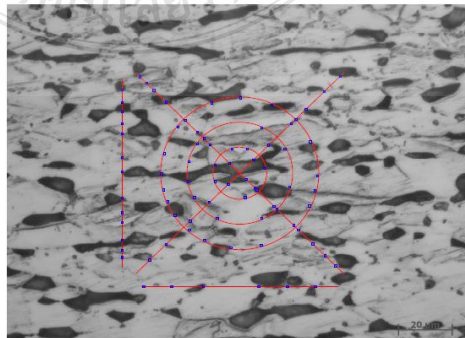


Output Image

ชั้นที่ 2 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.34

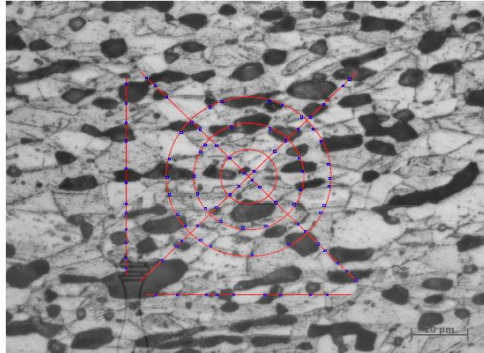


Output Image

ชั้นที่ 2 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 200 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 10.61

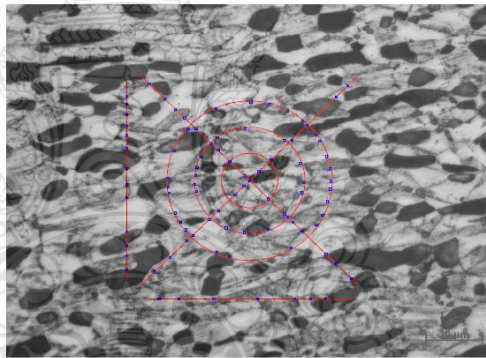


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 1

Snapshot 2

Size 10.64

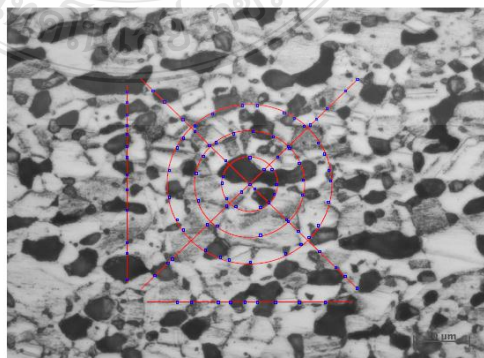


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 2

Snapshot 1

Size 10.91

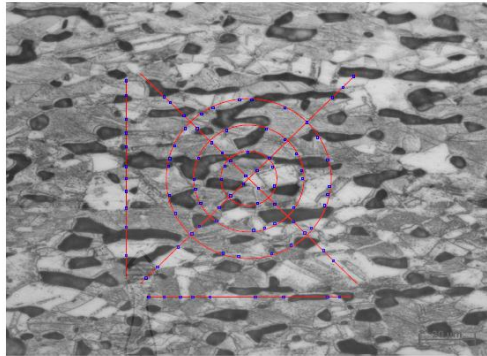


Output Image

ชั้นที่ 3 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 200 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 10.61

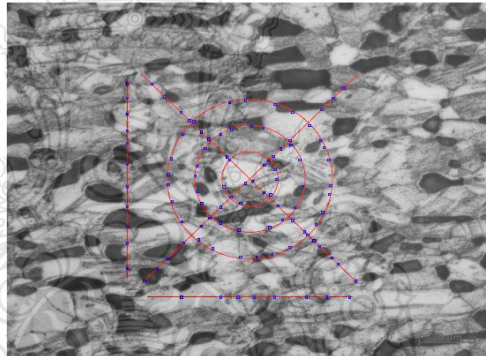


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.97

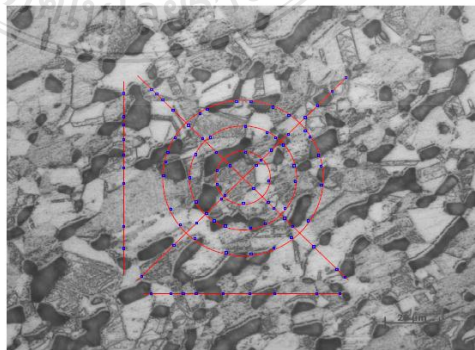


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.64

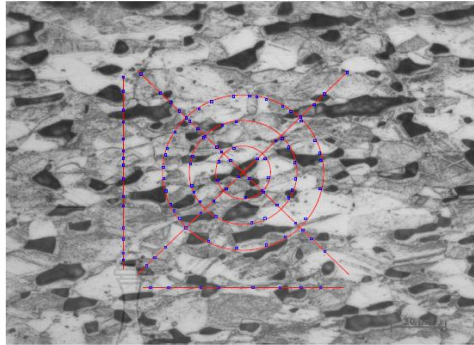


Output Image

ชั้นที่ 4 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 400 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 11.08

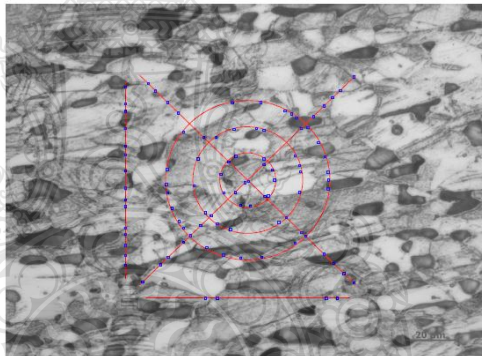


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.79

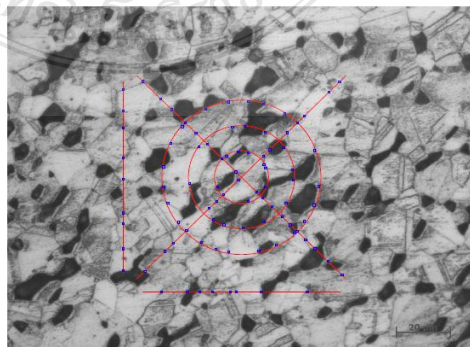


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.67

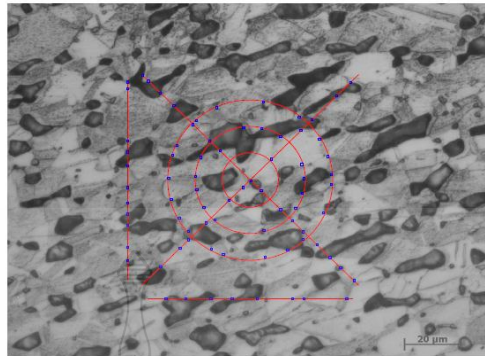


Output Image

ชั้นที่ 5 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 400 จุดที่ 3

Snapshot 3

Size 10.23



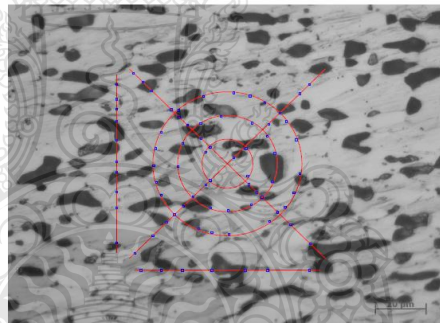
Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 400 จุดที่ 1

Measurement

Snapshot 1

Size 10.16

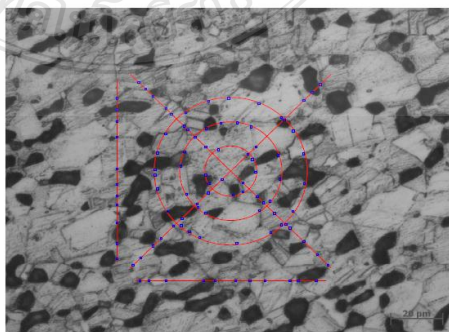


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 400 จุดที่ 2

Snapshot 2

Size 10.79

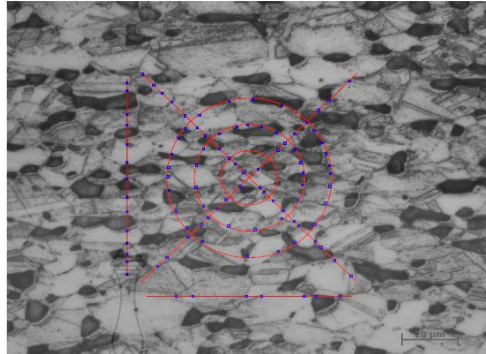


Output Image

ชั้นที่ 6 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 400 จุดที่ 3

Snapshot 2

Size 10.88

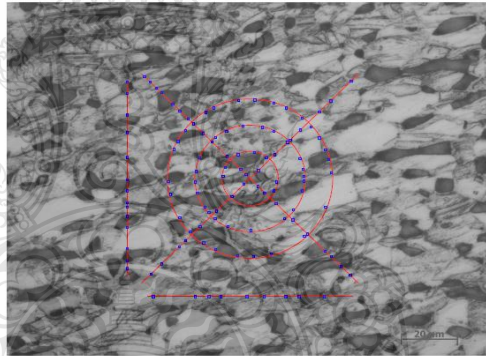


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 11.31

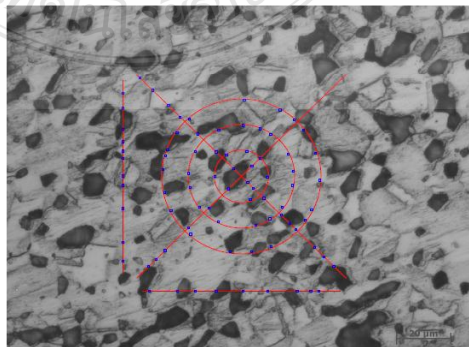


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 3

Size 10.37

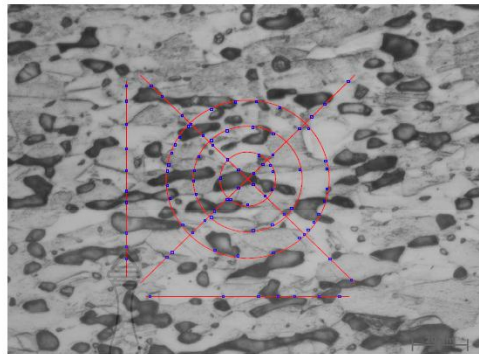


Output Image

ชั้นที่ 7 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 100, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

Snapshot 2

Size 10.61

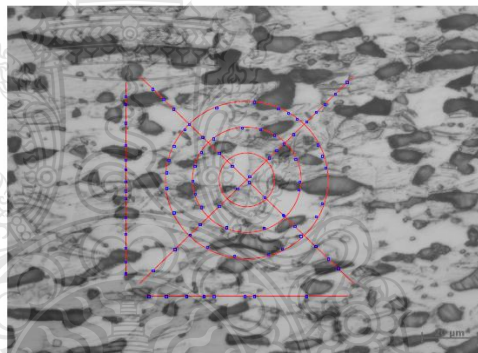


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.57

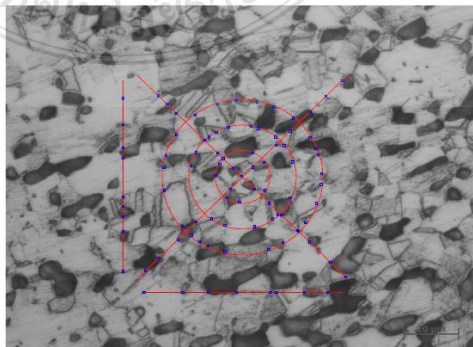


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 3

Size 10.64

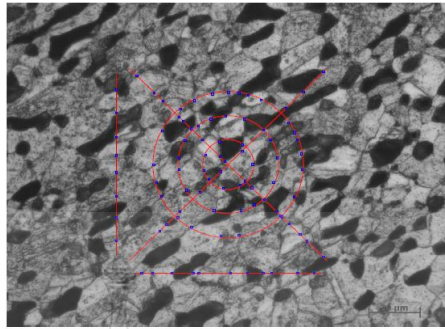


Output Image

ชั้นที่ 8 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 200, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

Snapshot 2

Size 10.64

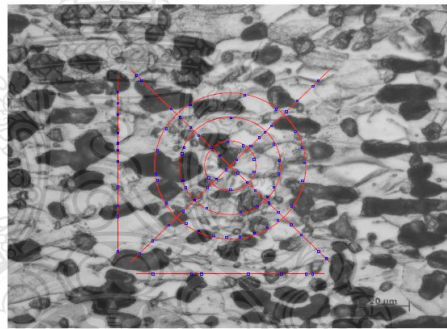


Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 1

Snapshot 1

Size 10.67

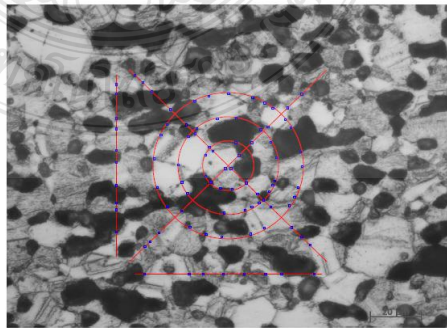


Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 2

Snapshot 3

Size 10.61



Output Image

ชั้นที่ 9 มุม 50, อัตราการเคลื่อน 300, ความเร็ว 600 จุดที่ 3

รูป จ.3 ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่ค่าถังขยาย 500 เท่า ที่มุม 50 องศา





**ภาคผนวก ฉ**  
**ข้อมูลการทดสอบ**

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา

| จุดที่                              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ชั้นที่ 1                           | 0.60 | 0.56 | 0.30 | 0.21 | 0.32 | 0.61 | 0.35 | 0.20 | 0.31 | 0.53 | 0.60 |
| ชั้นที่ 2                           | 0.63 | 0.51 | 0.30 | 0.20 | 0.33 | 0.59 | 0.34 | 0.20 | 0.30 | 0.53 | 0.61 |
| ชั้นที่ 3                           | 0.59 | 0.54 | 0.30 | 0.22 | 0.30 | 0.59 | 0.32 | 0.22 | 0.30 | 0.54 | 0.60 |
| ค่าเฉลี่ย<br>ความหนา<br>(มิลลิเมตร) | 0.61 | 0.54 | 0.30 | 0.21 | 0.32 | 0.60 | 0.34 | 0.21 | 0.30 | 0.53 | 0.60 |

ตารางที่ จ.2 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา

| จุดที่                              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ชั้นที่ 1                           | 0.60 | 0.54 | 0.40 | 0.32 | 0.54 | 0.60 | 0.54 | 0.32 | 0.40 | 0.54 | 0.60 |
| ชั้นที่ 2                           | 0.60 | 0.54 | 0.43 | 0.31 | 0.53 | 0.61 | 0.54 | 0.33 | 0.40 | 0.53 | 0.60 |
| ชั้นที่ 3                           | 0.62 | 0.56 | 0.41 | 0.32 | 0.51 | 0.60 | 0.53 | 0.32 | 0.42 | 0.55 | 0.60 |
| ค่าเฉลี่ย<br>ความหนา<br>(มิลลิเมตร) | 0.61 | 0.55 | 0.41 | 0.32 | 0.53 | 0.60 | 0.54 | 0.32 | 0.41 | 0.54 | 0.60 |

ตารางที่ จ.3 ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา

| จุดที่                              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ชั้นที่ 1                           | 0.60 | 0.55 | 0.44 | 0.42 | 0.54 | 0.61 | 0.55 | 0.50 | 0.45 | 0.56 | 0.60 |
| ชั้นที่ 2                           | 0.60 | 0.57 | 0.44 | 0.43 | 0.57 | 0.61 | 0.57 | 0.50 | 0.43 | 0.55 | 0.60 |
| ชั้นที่ 3                           | 0.60 | 0.54 | 0.42 | 0.42 | 0.55 | 0.60 | 0.55 | 0.49 | 0.47 | 0.55 | 0.60 |
| ค่าเฉลี่ย<br>ความหนา<br>(มิลลิเมตร) | 0.60 | 0.55 | 0.43 | 0.42 | 0.55 | 0.61 | 0.56 | 0.50 | 0.45 | 0.55 | 0.60 |



ตารางที่ ฉ.4 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไมลามาร์ที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

| ปัจจัยการทำงาน<br>ความเร็วเดิน/<br>ความเร็วรอบ | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา |     |     |           |          |      |      |           |          |     |     |           |
|--|-----------------------------|-----|-----|-----------|----------|------|------|-----------|----------|-----|-----|-----------|
|  | อัตราความเครียดหลัก %       |     |     |           |          |      |      |           |          |     |     |           |
|  | จุดที่ 1                    |     |     | ค่าเฉลี่ย | จุดที่ 2 |      |      | ค่าเฉลี่ย | จุดที่ 3 |     |     | ค่าเฉลี่ย |
| 100/200  | 50%                         | 55% | 55% | 56.67%    | 100%     | 100% | 100% | 100%      | 5%       | -5% | -5% | -1.67%    |
| 200/200  | 50%                         | 45% | 45% | 46.67%    | 100%     | 105% | 105% | 103.33%   | -5%      | -5% | 5%  | -1.67%    |
| 300/200  | 50%                         | 50% | 50% | 50%       | 105%     | 110% | 105% | 106.67%   | 0%       | -5% | 5%  | 0%        |
| 100/400  | 60%                         | 60% | 55% | 58.33%    | 105%     | 105% | 105% | 105%      | 5%       | -5% | 5%  | -1.67%    |
| 200/400  | 60%                         | 60% | 60% | 60%       | 105%     | 105% | 105% | 105%      | 0%       | -5% | 0%  | -1.67%    |
| 300/400  | 55%                         | 60% | 55% | 56.67%    | 110%     | 110% | 105% | 108.33%   | -5%      | -5% | 5%  | -1.67%    |
| 100/600  | 50%                         | 45% | 50% | 48.33%    | 110%     | 115% | 110% | 111.67%   | 5%       | -5% | 0%  | 0%        |
| 200/600  | 60%                         | 60% | 55% | 58.33%    | 110%     | 110% | 110% | 110%      | 5%       | -5% | 0%  | 0%        |
| 300/600  | 55%                         | 50% | 55% | 53.33%    | 110%     | 110% | 105% | 118.33%   | 0%       | -5% | 0%  | -1.67%    |

ตารางที่ จ.5 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

|               |                                  |
|---------------|----------------------------------|
| ความเร็วใน    | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา      |
| การเคลื่อนที่ | อัตราความเครียดหลัก % (จุดที่ 2) |



|                                | ความเร็วในการหมุน<br>200 รอบต่อนาที |         |         | ค่าเฉลี่ย | ความเร็วในการหมุน<br>400 รอบต่อนาที |         |         | ค่าเฉลี่ย | ความเร็วในการหมุน<br>600 รอบต่อนาที |         |         | ค่าเฉลี่ย |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|-----------|-------------------------------------|---------|---------|-----------|-------------------------------------|---------|---------|-----------|
|                                |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |
| 100 มิลลิเมตร                  | 112.65%                             | 111.59% | 110.76% | 111.59%   | 105.50%                             | 110.80% | 103.41% | 106.57%   | 115.32%                             | 117.34% | 116.20% | 116.29%   |
| ความถี่เรื้อรัง/<br>ความถี่รอบ |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |
| 200 มิลลิเมตร                  | 111.56%                             | 110.28% | 110.23% | 110.69%   | 111.30%                             | 110.24% | 112.25% | 111.26%   | 115.12%                             | 115.20% | 114.95% | 113.71%   |
| ต่อนาที                        |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |
| 300 มิลลิเมตร                  | 112.79%                             | 111.88% | 112.10% | 112.26%   | 117.58%                             | 118.48% | 119.41% | 118.49%   | 116.59%                             | 113.88% | 112.48% | 113.65%   |
| ต่อนาที                        |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |                                     |         |         |           |

ตารางที่ จ.6 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไม้ล่าที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

|  |     |     |     |        |     |     |     |        |    |     |     |        |
|--|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|--------|----|-----|-----|--------|
| 100/200                                | 30% | 35% | 35% | 33.33% | 50% | 50% | 50% | 50%    | 5% | -5% | 5%  | 1.67%  |
| 200/200                                | 50% | 50% | 50% | 50%    | 55% | 60% | 60% | 58.33% | 0% | -5% | 5%  | 0%     |
| 300/200                                | 50% | 45% | 45% | 46.67% | 55% | 60% | 55% | 56.67% | 0% | -5% | 0%  | -1.67% |
| ความเร็วในการ<br>เคลื่อนที่<br>100/400 | 45% | 40% | 45% | 43.33% | 55% | 50% | 50% | 51.67% | 5% | -5% | 0%  | 0%     |
| 200/400                                | 40% | 40% | 45% | 41.67% | 50% | 55% | 55% | 53.33% | 0% | -5% | 5%  | 0%     |
| 300/400                                | 35% | 40% | 40% | 38.33% | 55% | 55% | 55% | 55%    | 5% | -5% | 5%  | 1.67%  |
| 100/600                                | 35% | 35% | 40% | 36.67% | 50% | 50% | 55% | 51.67% | 0% | -5% | -5% | -3.33% |
| 200/600                                | 40% | 40% | 45% | 41.67% | 50% | 55% | 50% | 51.67% | 0% | -5% | -5% | -3.33% |
| 300/600                                | 50% | 45% | 45% | 46.67% | 50% | 55% | 55% | 53.33% | 0% | -5% | 0%  | -1.67% |

ตารางที่ ๗.7 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

|   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 100 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที                | 58.41% | 59.32% | 58.73% | 58.81% | 59.12% | 59.40% | 58.67% | 59.06% | 60.21% | 61.17% | 61.54% | 61.17% |
| 200 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที                | 61.81% | 61.52% | 60.64% | 61.67% | 60.52% | 60.14% | 59.43% | 60.14% | 61.98% | 62.12% | 61.58% | 61.89% |
| ความเร็วรอบ<br>300 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที | 64.01% | 63.76% | 63.51% | 63.76% | 62.20% | 61.76% | 61.87% | 61.94% | 62.14% | 62.08% | 62.45% | 62.22% |
| 100/200<br>ต่อนาที                      | 25%    | 30%    | 30%    | 56.67% | 30%    | 35%    | 35%    | 100%   | 0%     | -5%    | -5%    | -3.33% |

ตารางที่ จ.8 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้แผ่นไมลามี่ 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)





|                                    |     |     |     |        |     |     |     |         |     |     |     |           |
|------------------------------------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----------|
| 200/200                            | 25% | 25% | 30% | 46.67% | 35% | 30% | 30% | 103.33% | 0%  | -5% | 0%  | -1.67%    |
| 300/200                            | 35% | 30% | 30% | 50%    | 35% | 35% | 35% | 106.67% | 5%  | -5% | -5% | -1.67%    |
| 100/400                            | 30% | 30% | 30% | 58.33% | 30% | 30% | 30% | 105%    | 5%  | -5% | 5%  | 1.67%     |
| ความเร็วในการเคลื่อนที่<br>200/400 | 30% | 30% | 35% | 60%    | 35% | 30% | 35% | 105%    | 0%  | -5% | 5%  | 0%        |
| 300/400                            | 25% | 25% | 30% | 56.67% | 35% | 35% | 30% | 103.33% | 5%  | -5% | 0%  | ค่าเฉลี่ย |
| 100/600                            | 25% | 25% | 25% | 48.33% | 35% | 30% | 30% | 111.67% | 0%  | -5% | 0%  | -1.67%    |
| 200/600                            | 25% | 25% | 30% | 58.33% | 35% | 35% | 30% | 110%    | -5% | -5% | -5% | -5%       |
| 300/600                            | 30% | 30% | 25% | 53.33% | 35% | 30% | 35% | 118.33% | -5% | -5% | 0%  | -3.33%    |

ตารางที่ จ.9 ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรม ที่มุม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)

|  |        |        |            |        |        |  |        |        |        |        |        |        |       |
|--|--------|--------|------------|--------|--------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 100 มิลลิเมตร<br>ต่อนาที   | 33.10% | 33.04% | 32.51<br>% | 32.88% | 31.95% | 32.48%   | 32.48% | 32.30% | 30.45% | 30.12% | 30.10% | 30.22% |       |
| ปัจจัยการทำงาน<br>200 มิลลิเมตร<br>ความเร็วเดิน/<br>ต่อนาที<br>ความเร็วรอบ | 31.25% | 31.88% | 31.54<br>% | 31.57% | 32.41  | มุมที่ใช้การขึ้นรูป 30 องศา<br>32.04      32.54  |        | 32.33% | 32.45  | 33.12  | 33.21  | 32.93% |       |
|  |        |        |            |        |        | อัตราความเครียด<br>จุดที่ 1      ค่าเฉลี่ย      จุดที่ 2      ค่าเฉลี่ย      จุดที่ 3      ค่าเฉลี่ย |        |        |        |        |        |        |       |
| 300 มิลลิเมตร  | 35.17  | 38.80  | 35.52      | 35.50% | 35.32  | 35.60  | 35.01  | 35.31% | 33.30  | 33.60  | 33.87  | 33.53% |       |
| 100/200<br>ต่อนาที   |        | 5%     | 0%         | 5%     | 3.33%  | 5%   | 0%     | 5%     | 3.33%  | 0%     | -5%    | 0%     | 1.67% |

ตารางที่ น.10 อัตราความเครียด (%)



|   |    |    |    |       |    |     |    |       |     |     |     |        |
|---|----|----|----|-------|----|-----|----|-------|-----|-----|-----|--------|
| 200/200                                 | 0% | 0% | 5% | 1.67% | 0% | 10% | 5% | 5%    | 5%  | 0%  | 5%  | 3.33%  |
| 300/200                                 | 5% | 5% | 0% | 3.33% | 5% | 0%  | 0% | 1.67% | -5% | 0%  | 0%  | -1.67% |
| ปัจจัยการทำงาน<br>100/400               | 5% | 0% | 0% | 1.67% | 0% | 0%  | 5% | 1.67% | 0%  | -5% | 5%  | 0%     |
| ความเร็วเดิน/<br>200/400<br>ความเร็วรอบ | 0% | 5% | 5% | 3.33% | 5% | 5%  | 0% | 3.33% | 5%  | 0%  | 0%  | 1.67%  |
| 300/400                                 | 5% | 0% | 5% | 3.33% | 0% | 5%  | 5% | 3.33% | -5% | 0%  | 0%  | -1.67% |
| 100/200                                 | 5% | 0% | 0% | 1.67% | 0% | 5%  | 5% | 3.33% | 5%  | 0%  | 0%  | 1.67%  |
| 100/600                                 | 0% | 0% | 5% | 1.67% | 5% | 5%  | 5% | 5%    | 0%  | -5% | 0%  | 0%     |
| 200/600                                 | 5% | 0% | 0% | 1.67% | 0% | 0%  | 5% | 1.67% | 0%  | 0%  | -5% | -1.67% |
| 300/600                                 | 0% | 0% | 5% | 1.67% | 0% | 5%  | 5% | 3.33% | 0%  | 0%  | 0%  | 0%     |

ตารางที่ ฉ.11 อัตราความเครียด (%)



|   |     |          |    |           |    |          |    |           |     |          |     |           |
|---|-----|----------|----|-----------|----|----------|----|-----------|-----|----------|-----|-----------|
| 200/200                                 | 5%  | 5%       | 0% | 3.33%     | 0% | 0%       | 5% | 1.67%     | 0%  | 5%       | 0%  | 1.67%     |
| 300/200                                 | 5%  | 0%       | 0% | 1.67%     | 5% | 5%       | 0% | 3.33%     | 0%  | 0%       | 0%  | 0%        |
| ปัจจัยการทำงาน<br>100/400               | 5%  | 5%       | 0% | 3.33%     | 5% | 5%       | 5% | 5%        | -5% | 0%       | 5%  | 0%        |
| ความเร็วเดิน/<br>200/400<br>ความเร็วรอบ | 5%  | 5%       | 0% | 3.33%     | 0% | 0%       | 5% | 1.67%     | 5%  | 0%       | 0%  | 1.67%     |
|   |     | จุดที่ 1 |    | ค่าเฉลี่ย |    | จุดที่ 2 |    | ค่าเฉลี่ย |     | จุดที่ 3 |     | ค่าเฉลี่ย |
| 300/400                                 | 5%  | 0%       | 0% | 1.67%     | 5% | 0%       | 0% | 1.67%     | -5% | 0%       | 0%  | -1.67%    |
| 100/200                                 | 5%  | 0%       | 5% | 3.33%     | 5% | 0%       | 5% | 3.33%     | 0%  | 0%       | 5%  | 3.33%     |
| 100/600                                 | -5% | 5%       | 0% | 0%        | 0% | 5%       | 0% | 1.67%     | -5% | 5%       | 0%  | 0%        |
| 200/600                                 | 5%  | 0%       | 0% | 1.67%     | 5% | 5%       | 0% | 3.33%     | 5%  | 0%       | -5% | 0%        |
| 300/600                                 | 0%  | 5%       | 0% | 1.67%     | 0% | 0%       | 5% | 1.67%     | 0%  | -5%      | 0%  | -1.67%    |

ตารางที่ ฉ.12 อัตราความเคี้ยวครอง (%)



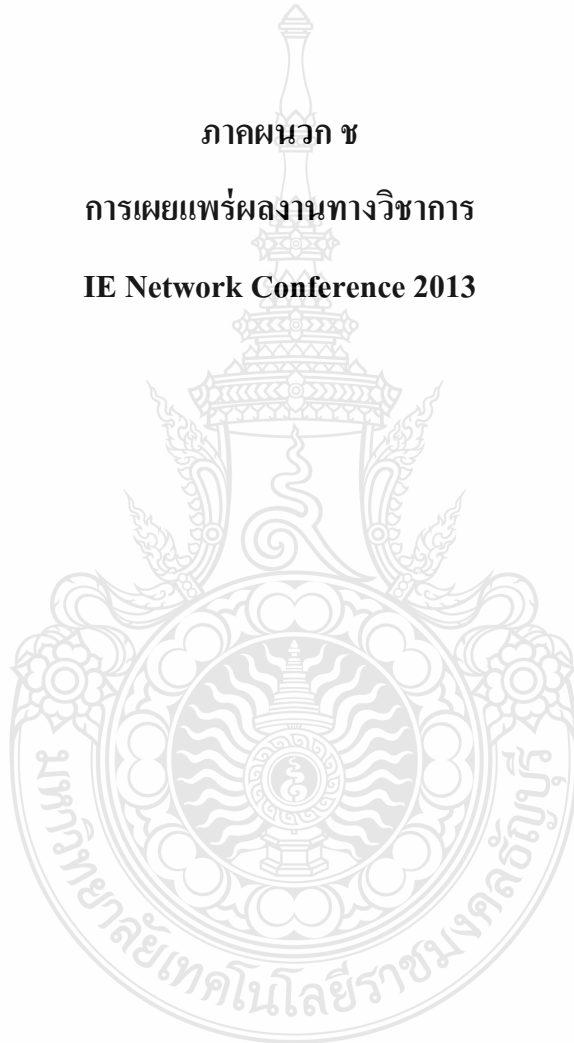
|         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |       |
|---------|----|----|----|-------|----|----|----|-------|----|----|----|-------|
| 200/200 | 5% | 5% | 5% | 5%    | 5% | 5% | 0% | 3.33% | 0% | 5% | 0% | 1.67% |
| 300/200 | 0% | 5% | 5% | 3.33% | 0% | 5% | 0% | 1.67% | 0% | 0% | 5% | 1.67% |
| 100/400 | 0% | 0% | 5% | 1.67% | 5% | 5% | 0% | 3.33% | 0% | 5% | 5% | 3.33% |
| 200/400 | 0% | 5% | 0% | 1.67% | 0% | 5% | 5% | 3.33% | 0% | 5% | 0% | 1.67% |
| 300/400 | 0% | 5% | 5% | 3.33% | 0% | 5% | 0% | 1.67% | 5% | 0% | 0% | 1.67% |
| 100/600 | 0% | 5% | 5% | 3.33% | 0% | 0% | 5% | 1.67% | 5% | 5% | 0% | 3.33% |
| 200/600 | 0% | 5% | 5% | 3.33% | 0% | 0% | 5% | 1.67% | 0% | 5% | 0% | 1.67% |
| 300/600 | 0% | 0% | 5% | 1.67% | 5% | 5% | 5% | 5%    | 5% | 0% | 5% | 0%    |



ภาคผนวก ข

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

IE Network Conference 2013





ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยมหิดล

ร่วมกับ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยศิลปากร

Proceedings

**IE Network Conference 2013**

**Green Productivity and Innovation**

16 - 18 ตุลาคม 2556

โรงแรม เอวัน เดอะ รอยัล ครุช พัทยา ชลบุรี