

อิทธิพลของการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและความเค้นตกค้าง
ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด
อลูมิเนียม AL5052

INFLUENCE OF FORMING ON SURFACE ROUGHNESS AND
RESIDUAL STRESS WITH TWO-POINT INCREMENTAL SHEET
FORMING PROCESS (TPIF) OF AL5052 ALUMINUM ALLOY

เกียรติพงษ์ อ่อนบัตร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและความเค้นตกค้าง
ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด
อลูมิเนียม AL5052

เกียรติพงษ์ อ่อนบัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและความเค้นตกค้างด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุดอลูมิเนียม AL5052
Influence of Forming on Surface Roughness and Residual Stress with Two-Point Incremental Sheet Forming Process (TPIF) of AL5052 Aluminum Alloy

ชื่อ - นามสกุล

นายเกียรติพงษ์ อ่อนบัตร

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2566

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วิหุร อุทัยแสงสุข, Dr.-Ing.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและความเค้นตกค้าง ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุดอลูมิเนียม AL5052
ชื่อ - นามสกุล	นายเกียรติพงษ์ อ่อนบัตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปแผ่นโลหะแบบต่อเนื่อง (Incremental Sheet Forming - ISF) เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีความยืดหยุ่นสูงในการขึ้นรูปแผ่นโลหะ เนื่องจากมีความโดดเด่นด้านลดการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการขึ้นรูปที่ยังยาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างความซับซ้อนได้ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องถูกออกแบบสำหรับการผลิตชิ้นงานตัวอย่าง หรือชิ้นงานเฉพาะ เป็นเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อลดการใช้งบประมาณในการผลิตแม่พิมพ์ ใช้เพียงเครื่องจักร CNC

ในการทดลองขึ้นรูปแผ่นโลหะอลูมิเนียมผสม AL5052 แบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด เครื่องมือกดขึ้นรูปทรงกลมหัวบอล ชิ้นงานขึ้นรูปเป็นลักษณะทรงกรวย ใช้เครื่องจักร CNC ในการขึ้นรูป โดยมีปัจจัยในการขึ้นรูป คือ ความเร็วในการขึ้นรูป 1,000 มิลลิเมตร/นาที ความลึกในการขึ้นรูป 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของหัวกด 0, 500 และ 1,000 รอบ/นาที การออกแบบการทดลองใช้วิธีการทากูชิ L9 สำหรับการตรวจสอบปัจจัยที่เหมาะสม และค้นหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ ANOVA ตลอดจนคาดการณ์และ สร้างสมการถดถอยเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของความเรียบผิวและความเค้นตกค้าง

จากการทดลอง พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมให้ค่าความเค้นตกค้างต่ำสุด เท่ากับ 21.14 MPa คือ ความเร็วรอบที่ 0 รอบ/นาที และ ความลึกในการขึ้นรูป 0.3 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าความเร็วรอบ และความลึกในการขึ้นรูป ส่งผลต่อความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยที่ความลึกในการขึ้นรูปส่งผลกระทบต่อความเค้นตกค้างสูงกว่าความเร็วรอบ การศึกษายังพบว่า ความเร็วรอบ และความลึกในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นแนวโน้มของความเค้นตกค้างที่ผิววัสดุมีค่าสูงขึ้น และจากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติของผลตอบพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : การขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด ความเค้นตกค้าง ความหยาบผิว

Thesis Title	Influence of Forming on Surface Roughness and Residual Stress with Two-Point Incremental Sheet Forming Process (TPIF) of AL5052 Aluminum Alloy
Name – Surname	Mr. Kiattipong Onbut
Program	Industrial and Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Sirichai Torsakul, Dr-Ing.
Academic Year	2023

ABSTRACT

Incremental Sheet Forming (ISF) represents a highly flexible metal forming process renowned for its versatility in shaping metal sheets due to its distinct advantages over reducing tool use and complicated molding equipment. This process is capable of forming intricate workpieces with complicated shapes. Incremental Sheet Forming (ISF) is specifically designed for the production of prototypes or specific workpieces. It is a technique that has been developed to reduce budget use in mold production, instead using only Computer Numerical Control (CNC) machines.

In this experimental study, the instruments involved the continuous forming of AL5052 aluminum alloy sheets with two-point contact using a ball head round shape press forming tool, the workpieces molded with a cone shape, and CNC machines used for forming. The forming factors were a forming speed of 1,000 mm/min., forming depths of 0.3, 0.5 and 0.7 mm, and rotational speeds of 0, 500 and 1,000 rpm. The experimental design used the Taguchi L9 method for examining appropriate factors. Further, to find out the factors that were statistically significant, the researcher conducted an ANOVA analysis, and prediction, and also created a regression equation to gain the appropriate values of surface roughness and residual stress.

The experiment's results revealed that the optimum factor for the lowest residual stress was 21.14 MPa, namely a rotational speed of 0 rpm and a forming depth of 0.3 mm. The ANOVA analysis displayed that the rotational speed and depth of molding had affected the residual stress of the workpieces at the confidence level of 95%. The machining depth had a higher effect on the residual stress than the rotational speed. The study also showed that the rotational speed and molding depth had increased. The trend of residual stress on the material surface was higher. In addition, from comparing the experimental results with those gained from the statistical analysis of the responses, it was shown that they had relatively close values.

Keywords: two-point incremental forming, residual stress, surface roughness

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้จากการช่วยเหลือของผู้มีอุปการคุณ ที่ให้ข้อเสนอแนะ ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ประณีตพลกรัง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ ที่ให้คำแนะนำในการจัดทำให้งานสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาช่างกลโรงงาน และสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ให้ความร่วมมือและอนุญาตให้ใช้เครื่องมือและ อุปกรณ์ในการทดลองในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรียา ประสมทอง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้ห้องทดลอง ทางโลหะวิทยา และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนครพนมที่สนับสนุนทุนการศึกษาในครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ ภรรยา ญาติ และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจตลอด มา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยครั้งนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของท่านช่างต้นผู้วิจัยรู้สึก ซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

เกียรติพงษ์ อ่อนบัตร์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ	11
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.1 แนวความคิด.....	15
2.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง.....	17
2.3 เส้นทางการเดินของหัวกด Tool path.....	21
2.4 อลูมิเนียมผสม.....	22
2.5 วัสดุทำเครื่องมือในการกดขึ้นรูป.....	25
2.6 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น.....	26
2.7 แผนรูปความเครียด.....	27
2.8 ความหยาบผิว.....	28
2.9 ความเค้นตกค้าง.....	30
2.10 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบน The X-ray diffraction technique.....	32
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 กระบวนการทดสอบ.....	36
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	38
3.3 การวิเคราะห์ตารางวงกลม (Grid circle analysis).....	40
3.4 วิธีการขึ้นรูป.....	41
3.5 การวัดความหนาผิว.....	42
3.6 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่อง XRD.....	42
3.7 การวิเคราะห์ Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio).....	43
3.8 นัยสำคัญของปัจจัยทางสถิติ (Analysis of Variance: ANOVA).....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลวิจัย.....	45
4.1 ความเครียดของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	45
4.2 ความหนาผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	51
4.3 X-Ray Diffraction technical.....	52
4.4 การวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูป.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ชิ้นงานก่อนวัดค่าความหนาผิว.....	80
ภาคผนวก ข การวัดความหนาผิวหลังการขึ้นรูป.....	84
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	100

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมและความแข็งแรงของอลูมิเนียม AA5052.....	22
ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทของอลูมิเนียมชนิดต่างๆ.....	23
ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติอลูมิเนียมผสม.....	24
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก JIS SKD 11.....	26
ตารางที่ 3.1 ลำดับในการทดลองขึ้นรูปที่ออกแบบด้วยเทคนิค Taguchi Orthogonal L9.....	38
ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด.....	39
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดจุลภาคของอลูมิเนียมที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูป.....	53
ตารางที่ 4.2 Factors and parameters of the experiment.....	56
ตารางที่ 4.3 Experimental layout: L9 orthogonal array, mean residual stress values, and S/N ratio values.....	56
ตารางที่ 4.4 Response table for S/N ratios of residual stress.....	58
ตารางที่ 4.5 Experimental layouts: L9 orthogonal array, mean surface roughness values, and S/N ratio values t.....	58
ตารางที่ 4.6 Response table for S/N ratios of Surface roughness.....	59
ตารางที่ 4.7 Analysis of variance for the S/N ratios for residual stress.....	60
ตารางที่ 4.8 Analysis of variance for the S/N for Surface roughness	61
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติของผลตอบ.....	62

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบและกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีใน แต่ละกระบวนการ (a) การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 1 จุดสัมผัส (SPIF). (b) การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 2 จุดสัมผัส(TPIF).....	12
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง.....	14
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 1 จุดสัมผัส.....	17
รูปที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัส.....	17
รูปที่ 2.4 การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็ม ทิศทางบวก.....	18
รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็ม ทิศทางลบ.....	19
รูปที่ 2.6 การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็ม ทิศทางลบ.....	19
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของ Forming tool (b) Forming tool ในลักษณะต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.8 ลักษณะของ (vertical rollerball tool: VRB).....	20
รูปที่ 2.9 ลักษณะของ Forming tool (a) Rigid (b) VRB และ (c) ORB.....	21
รูปที่ 2.10 การสร้างเส้นทาง ของหัวกด.....	21
รูปที่ 2.11 (ก) วงกลมบนโลหะแผ่น ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริด วงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรองคือ d_2 (ค) การดึง, T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง.....	26
รูปที่ 2.12 (ก) การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก (ข) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่า ความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก.....	27
รูปที่ 2.13 แสดงพื้นที่เหนือเส้นศูนย์กลางและใต้เส้นศูนย์กลาง.....	28
รูปที่ 2.14 การวัดค่าความหยابผิว.....	29
รูปที่ 2.15 การวัดค่าความหยابผิวเฉลี่ยของพื้นที่ผิว.....	29
รูปที่ 2.16 ความเค้นตกค้างชนิดที่ 1 (Type 1).....	30
รูปที่ 2.17 ความเค้นตกค้างชนิดที่ 2 (Type 2).....	31
รูปที่ 2.18 ชนิดของความเค้นตกค้างแบ่งตามระดับสเกล (Scale) โดยที่อักษรตรงหน้าตัวห้อย M แทนเฟสเนื้อพื้น และ R แทน เฟสวัสดุเสริมแรง (Reinforcement).....	31
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย.....	35
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบ อลูมิเนียม AA5052.....	36
รูปที่ 3.3 หัวกดขึ้นรูป.....	37
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดโลหะแผ่นในกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด.....	37
รูปที่ 3.5 แสดงขนาด มุมและตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	39
รูปที่ 3.6 การกัดผิววัสดุเป็นตารางวงกลมด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7 การติดตั้งชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป.....	41
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป.....	41
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหยาบผิว.....	42
รูปที่ 3.10 บริเวณที่ทำการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาค.....	42
รูปที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็วรอบ ในการขึ้นรูป 0 rpm.....	46
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงาน หลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm.....	47
รูปที่ 4.3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็วรอบ ในการขึ้นรูป 500 rpm	48
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงาน หลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 500 rpm	49
รูปที่ 4.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็วรอบ ในการขึ้นรูป 1000 rpm	50
รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของ ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 1000 rpm	51
รูปที่ 4.7 ความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0-1000 rpm ระยะการกดลึก 0.3-0.7 มิลลิเมตร.....	52
รูปที่ 4.8 shows the XRD analysis.....	53
รูปที่ 4.9 Shows the Plot of $\sigma_r \cos \psi$ versus $4 \sin \psi$	54
รูปที่ 4.10 Shows the Plot of Residual stress versus Step-down increment.....	55
รูปที่ 4.11 Main effects plot for the S/N ratio for residual stress.....	57
รูปที่ 4.12 Main effects plot for the S/N ratio for Surface roughness.....	59

บทที่ 1

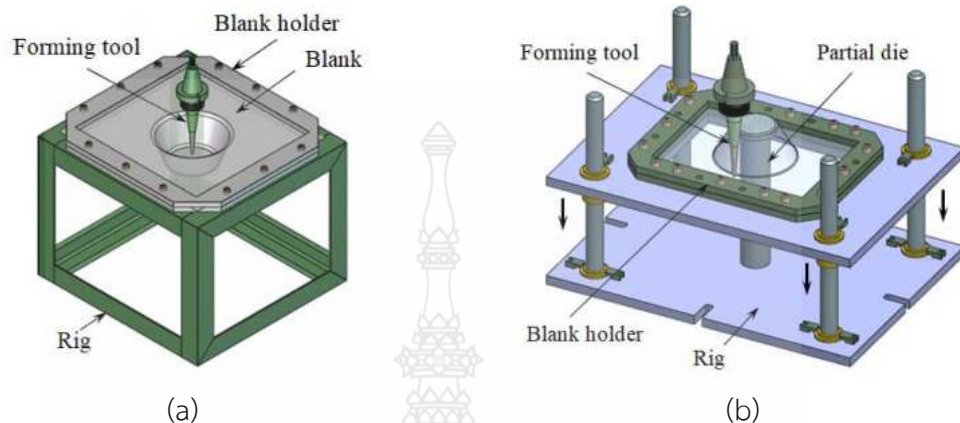
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขึ้นรูปแผ่นโลหะแบบต่อเนื่อง (incremental sheet forming : ISF) เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีความยืดหยุ่นสูงเนื่องจากปราศจากเครื่องมือและอุปกรณ์ในการขึ้นรูปที่ยุ่ยาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างง่ายดาย กระบวนการ ISF ถูกออกแบบสำหรับการผลิตชิ้นงานเฉพาะ เช่น ชิ้นส่วนด้านอากาศยาน หรือชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งอุปกรณ์ในการขึ้นรูปมีเพียงเครื่องมือในการกดขึ้นรูปทรงกลม (Forming Tool) อุปกรณ์จับยึดแผ่นชิ้นงาน (Blank holder) และเครื่องจักรที่สามารถควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC) ก็สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงตามต้องการ [1-3] ISF ถูกจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) กระบวนการ Single point incremental forming (SPIF) เป็นเทคนิคในการขึ้นรูปที่แผ่นโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ ในการขึ้นรูปโดยปราศจากอุปกรณ์ในการรองรับชิ้นงาน (Partial die) และตัวจับยึดชิ้นงาน (Blank holder) ไม่มีการเคลื่อนที่ขณะทำการขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 1(a) (2) Two point incremental forming (TPIF) process จะมีลักษณะแตกต่างจาก SPIF คือ มักจะมีอุปกรณ์ในการรองรับชิ้นงาน (Partial die) และตัวจับยึดชิ้นงาน (Blank holder) สามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางการกดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 1(b) [4] กระบวนการ ISF ทั้งสองกระบวนการผลิตชิ้นงานโดยการทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องมือที่กดลงตามระยะที่กำหนด ฉะนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรด้วยสภาวะความเครียดจนทำให้เกิดความเค้นบริเวณผิวโลหะจนนำไปสู่การดีดตัวกลับ (Spring back) หรือแม้แต่ความเสียหายจากความล้า [5-7] ที่จะเกิดขึ้นตามมาในกรณีที่มีการเลือกใช้ตัวแปรในการขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นมักได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ในกระบวนการ เช่น ความเร็วรอบในการขึ้นรูปของเครื่องมือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ ระยะในการกดขึ้นรูป หรือแม้แต่นำขนาดของรัศมีเครื่องมือ โดยปัจจัยเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความเค้นสะสมหรือความเค้นตกค้างตลอดจนความเรียบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [8-10]

การตรวจสอบค่าความเค้นตกค้าง นิยมใช้เทคนิค X-ray diffraction [11] เพราะเป็นวิธีการที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งในกระบวนการ ISF ก็มักใช้เทคนิค X-ray diffraction อาทิ Slota, Ján, et al. [12] วิเคราะห์ความเค้นตกค้างของชิ้นงานรูปทรงกรวยด้วยกระบวนการ SPIF ทำการศึกษาปัจจัยในการขึ้นรูปจากนั้นทำการวัดค่าความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค X-ray diffraction พบว่าค่าความเค้นเฉลี่ยที่ 84.5 MPa Tanaka, Shigekazu, et al. [13] ตรวจสอบความเค้นตกค้างของชิ้นงานอลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ SPIF ด้วยการใช้เทคนิค X-ray diffraction โดยทำการศึกษารัศมีของเครื่องมือและอัตราป้อนที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้าง พบว่ารัศมีของเครื่องมือส่งผลต่อปริมาณความเค้นตกค้างมากกว่าอัตราป้อน Maaß, Fabian, et al. [14] ศึกษาอิทธิพลของ tool path strategies ต่อค่าความเค้น

ตักด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบ SPIF ด้วยการใช้เทคนิค X-ray diffraction จากการตรวจสอบพบว่า tool path ไม่ส่งผลต่อความเค้นตักมากนัก และมีหลากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงอิทธิพลของปัจจัยในการขึ้นรูปแบบ SPIF ที่ส่งผลต่อค่าความเค้นตักของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [16]



รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบและกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีในแต่ละกระบวนการ (a) การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 1จุดสัมผัส (SPIF). (b) การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 2 จุดสัมผัส(TPIF) [4]

ปัจจุบันมีหลากหลายงานวิจัยได้เสนอแนวทางการออกแบบการทดลองสำหรับการทำนายและการหาค่าที่เหมาะสมของการขึ้นรูป SPIF เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น Bahloul R et al. [18] ศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูป SPIF คือ wall angle, tool size, material thickness, and vertical step size ทำการออกแบบการทดลองทางสถิติ และการประยุกต์ใช้ Response surface methodology (RSM) โดยการสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบแบบ Box-Behnken พบว่า โมเดลที่สร้างขึ้นสามารถนำไปทำนายผลตอบของกระบวนการ SPIF ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Azhiri R B et al.[19] ตรวจสอบปัจจัยในการขึ้นรูป SPIF อลูมิเนียมผสม AA5052 พารามิเตอร์ในการศึกษา ได้แก่ the type of the tool, feed rate and step down ที่ส่งผลต่อ surface roughness ออกแบบการทดลองด้วย full factorial experimental design เพื่อหาค่าตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ ball nose tool, 200 mm/min of feed rate and 0.4 mm step down. Mulay Amrut et al.[20] สร้างแบบจำลองการทำนายผลด้วย artificial neural network (ANN) ของกระบวนการ SPIF ในการขึ้นรูปอลูมิเนียมผสม AA5052-H32 ต่อค่าความเรียบผิวหลังการขึ้นรูป พบว่า โมเดล ANN ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลตอบของกระบวนการได้อย่างแม่นยำ Sbayti M et al.[21] ออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken และ Response surface methodology (RSM) สำหรับทำนาย final geometry ของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ

SPIF จากการศึกษา พบว่า แบบจำลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถคาดการณ์ผลตอบได้อย่างแม่นยำ Najm S M et al.[22] ศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือขึ้นรูป (Forming Tool Characteristics) ที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของอลูมิเนียมด้วยกระบวนการขึ้นรูป SPIF สร้างแบบจำลองการคาดการณ์ผลตอบด้วย ANN and SVR พบว่าแบบจำลองสามารถคาดการณ์ความเรียบผิวได้อย่างแม่นยำ และยังมีหลากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงการคาดการณ์ผลตอบของกระบวนการ SPIF

จากงานวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้นพบว่าการศึกษาร่วมใหญ่มุ่งเน้นในการตรวจสอบพารามิเตอร์ของกระบวนการ SPIF แต่สำหรับกระบวนการ TPIF ยังไม่มีการกล่าวถึงมากนัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการและแนวความคิดข้างต้นมาใช้ในการศึกษาการกระบวนการ TPIF ในกระบวนการขึ้นรูปอลูมิเนียม AA5052 ซึ่งพารามิเตอร์การขึ้นรูปประกอบด้วย Rotation speeds และ Incremental depth ที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิว ความเครียด และความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ S/N Ratio โดยใช้วิธีทากูชิ [23-24] และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับคาดการณ์ residual stress and surface roughness รวมถึงสร้างสมการถดถอยในการคำนวณเพื่อทำนาย Rotation speeds และ Incremental depth ที่ส่งผลต่อ residual stress and surface roughness ของชิ้นงาน AA5052 aluminum alloy ที่ผลิตจากการขึ้นรูป TPIF โดยวิธีทากูชิจะสามารถออกแบบกระบวนการขึ้นรูปแบบ TPIF ได้ผลวิจัยที่ถูกต้องและจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตและผู้สนใจศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบ TPIF ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อความเครียด ความเค้นตกค้าง และค่าความเรียบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องของชิ้นงานอลูมิเนียมผสม AA5052

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาข้อมูลการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ TPIF (Partial die) ด้วยเครื่องกัด CNC

1.3.1 กำหนดตัวแปรในการเชื่อมทดลองดังนี้

1.3.1.1 ขึ้นรูปโลหะอลูมิเนียม AL5052 ความหนาระหว่าง 1.0 มม.ขนาด 200x200 มม.

1.3.1.2 หัวกด (Forming tool) เป็นแบบ หัวกดแบบลูกบอลในแนวตั้ง

1.3.1.3 การทดลองการขึ้นรูปทรง กรวยขนาดก้นกรวยเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. มุม 25 องศา ลึก 60 มม.

1.3.1.4 การสร้างแบบจำลองด้วย โปรแกรม SOLID WORK

1.3.1.5 ความเร็วรอบของหัวกด 0, 500 และ 1000 รอบต่อนาที

1.3.1.6 การเคลื่อนที่ของหัวกด เป็นแบบเกลียว (Helix) เคลื่อนที่จาก บนลงล่าง อัตราป้อนลึก ในการกดแต่ละ 0.3, 0.5 และ 0.7 มม./รอบ

1.3.2 ศึกษาความเครียดและค่าความเรียบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

1.3.3 ศึกษาความเค้นตกค้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction, XRD)

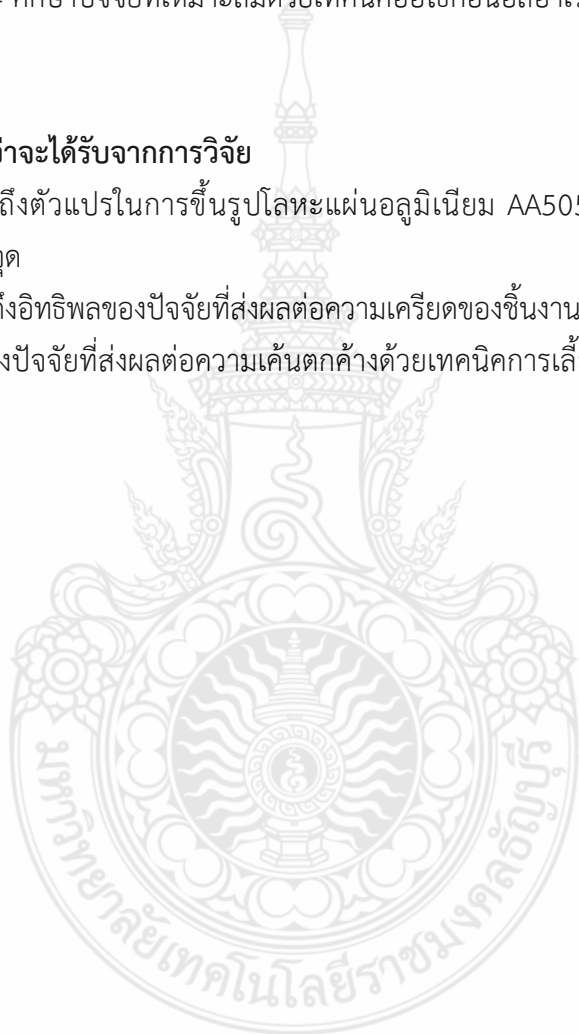
1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมด้วยเทคนิคอาร์เรย์ (Orthogonal array-L9) (3³) ด้วยวิธีทากูชิ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงตัวแปรในการขึ้นรูปโลหะแผ่นอลูมิเนียม AA5052 ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสองจุด

1.4.2 ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความเครียดของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

1.4.3 ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction, XRD)



บทที่ 2

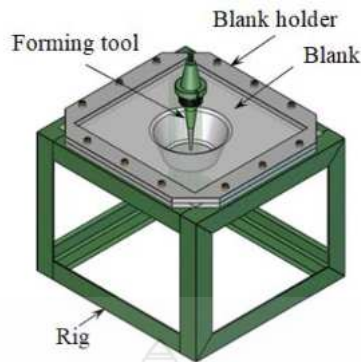
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวความคิด

ผลการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นการเปลี่ยนรูปโลหะด้วยแรง ทำให้โลหะแผ่นเสียรูปแบบถาวร ตามการออกแบบ ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนในปัจจุบันต้องมีขั้นตอนการผลิตที่หลายขั้นตอน ทั้งการออกแบบ, การสร้างแม่พิมพ์และการปรับแก้แม่พิมพ์เป็นต้น ต้องลงทุนกับเครื่องจักรหนักขนาดใหญ่ที่ใช้แรงมาก ซึ่งทั้งหมดนี้มีต้นทุนในการลงทุนในการผลิตช่วงเริ่มต้นที่สูงมากทำให้อุตสาหกรรมแม่พิมพ์บ่มขึ้นรูปเหมาะกับการขึ้นรูปชิ้นงานที่รูปร่างเดิมมีจำนวนการผลิตมาก จึงจะคุ้มทุน ซึ่งการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องเหมาะกับการผลิตชิ้นงานที่มีจำนวนชิ้นงานน้อยชิ้นและลงทุนในการผลิตต่ำ สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสองจุด จะทำการศึกษาขึ้นรูปโดยใช้วัสดุ อลูมิเนียมแผ่น ที่เป็นโลหะที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ในหลายอุตสาหกรรม ในปัจจุบัน มีการศึกษาปัจจัยในการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป หลายปัจจัย เช่น มุมองศาที่ใช้ในการขึ้นรูป ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นรูป ความเร็วรอบของการหมุนหัวกด รูปแบบของหัวกดชนิดต่าง นำมาเปรียบเทียบกับลักษณะชิ้นงานที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป ความหนาผิว, ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวของแผ่นโลหะและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป จากการศึกษาจะสามารถนำมาเป็นข้อมูล และเป็นทางเลือกสำหรับ อุตสาหกรรมผลิตโลหะแผ่นด้วยการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องสองจุด

2.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง (Incremental Sheet Forming : ISF) เป็นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยเครื่องกัด CNC หรือหุ่นยนต์แขนกล โดยใช้หัวกด กดบนแผ่นโลหะทำให้เปลี่ยนรูปตามที่ต้องการแบบใช้วิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องเริ่มการออกแบบด้วยการสร้างโมเดล 3 มิติ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-aided design : CAD) เมื่อได้โมเดล 3 มิติ แล้วจะนำโมเดล 3 มิตินั้นมาสร้างเส้นทางการเดินทางของหัวกด (Tool Path) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing :CAM) [4] เมื่อได้ชุดคำสั่งแล้วจะส่งโปรแกรมเข้าเครื่องจักร CNC เครื่องจักรจะพาหัวกดจะทำหน้าที่ดันแผ่นโลหะให้เสียรูปอย่างถาวรตามที่ต้องการแบบใช้แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง

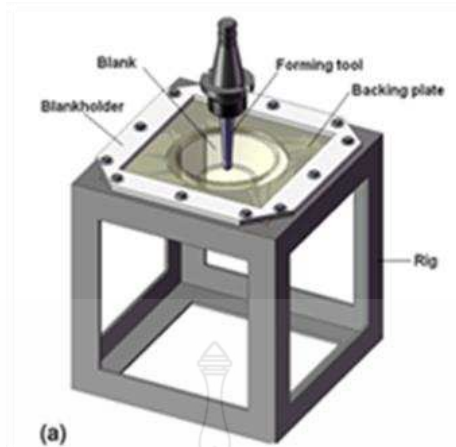
ในปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่น ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง (ISF) ต้องการรูปขึ้นงานที่หลากหลายรูปร่างอย่างเช่นเป็นทรงกระบอก, รูปทรงถ้วย, รูปทรงที่สมมาตร, รูปทรงที่ไม่สมมาตรและทำให้มีกระบวนการขึ้นรูปที่หลากหลายสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ [25] ได้แก่

- 1) การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 1 จุด สัมผัส Single-point Incremental Forming (SISF)
- 2) กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 2 จุด สัมผัส Two-point Incremental Forming (TISF) 2 two-sided Incremental Forming (TSISF) ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 2 จุด ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้ดังนี้

- กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเฉพาะส่วน Incremental forming with Partial die Support
- การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับแบบไม่สมมาตรเต็ม ทิศทางบวก Incremental forming with Asymmetrical Positive Support
- การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็ม ทิศทางลบ Incremental forming with Asymmetrical Negative Support

2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง (ISF)

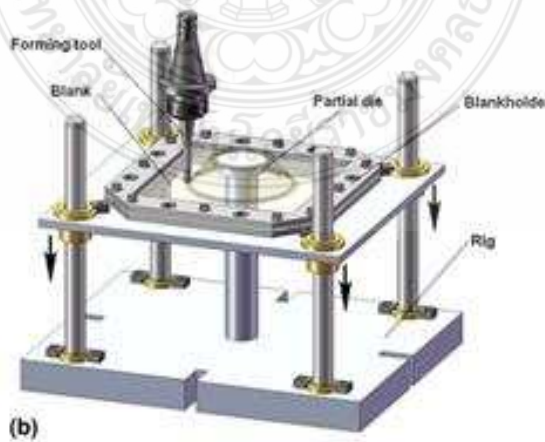
1. การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 1จุด สัมผัส (SISF) เป็นการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่เป็น การนำเอาโลหะแผ่นมายึดกับแท่นรองรับ โดยมีหัวกดจะถูกควบคุมให้กดลงในชิ้นงานให้เสียรูปตาม ที่ ออกแบบไว้ หัวกดจะหมุนหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามการกำหนดของโปรแกรม ในการผลิตชิ้นงานด้วย วิธีนี้สามารถทำได้ง่าย ใช้อุปกรณ์น้อย



รูปที่ 2.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 1 จุดสัมผัส

2. กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 2 จุด สัมผัส(TISF) เป็นการทำให้โลหะเสียรูปจากจุดสัมผัสสองจุดคือ หัวกดและแม่พิมพ์รองรับ ในการจับยึดชิ้นงานมีลักษณะคล้ายกับ SISF ต่างกันที่แผ่นโลหะสามารถเคลื่อนที่ได้ขึ้นลงในแนวแกน Z โดยมีหัวกดกดลงบนแผ่นโลหะจากบนลงล่างตามลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน ในการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสองจุดสามารถแบ่งประเภทการทำงานได้ 2 แบบ ตาม ลักษณะของแม่พิมพ์รองรับ คือแบบแม่พิมพ์เฉพาะส่วนและแบบแม่พิมพ์รองรับแบบเต็มส่วน ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

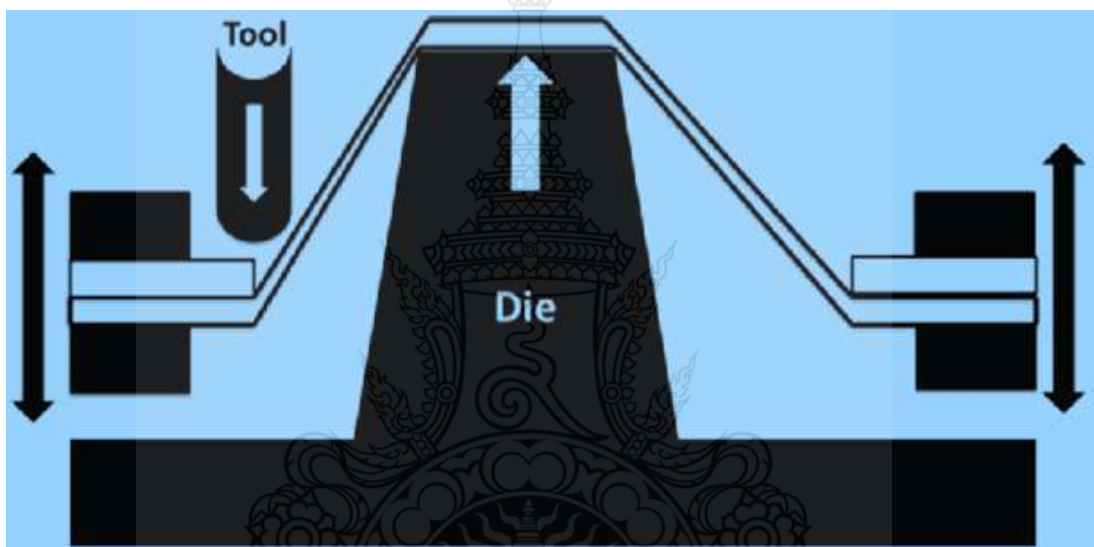
- กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเฉพาะส่วน Incremental forming with Partial die Support เป็นการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยมีจุดสัมผัสที่หัวกดและแม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วนทำการรองรับเฉพาะพื้นที่ที่กำหนดไว้บนชิ้นงาน กระบวนการนี้จะเพิ่มความเที่ยงตรงของรูปทรงของชิ้นงาน ในชิ้นงานที่มีการขึ้นรูปที่รูปทรงที่ไม่สมมาตรก็ยังสามารถนำแม่พิมพ์รองรับไปผลิตชิ้นงานที่หลากหลายได้ต่อไป



รูปที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัส

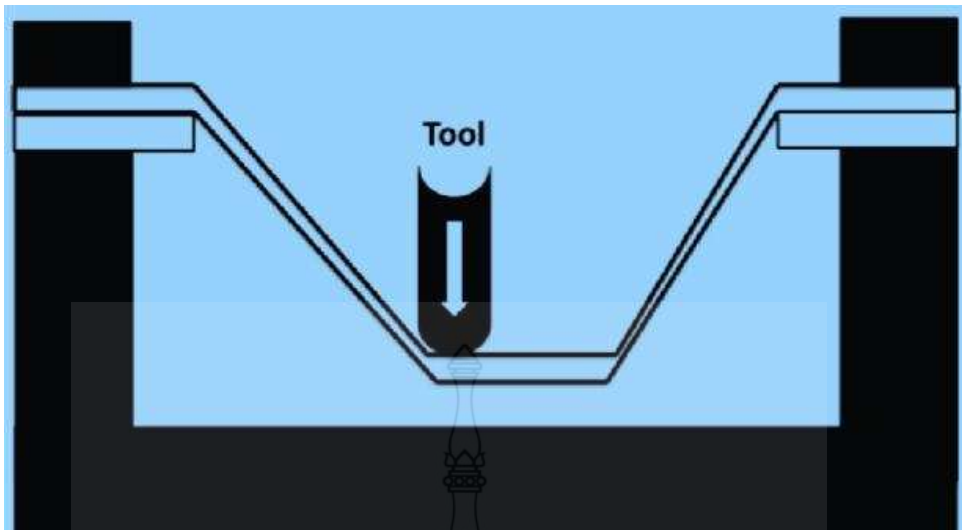
- กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสองจุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็มส่วน ทำให้พื้นที่ในการรองรับมากส่งผลให้เพิ่มความเที่ยงตรงในการขึ้นรูปชิ้นงานได้ดี ในการการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสองจุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็มส่วนนั้นสามารถแบ่งประเภทตามรูปแบบของแท่นรองรับได้ 2 ประเภท คือ

- การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับแบบไม่สมมาตรเต็ม ทิศทางบวก Incremental forming with Asymmetrical Positive Support โดยมีหัวกดเคลื่อนเริ่มกลางแล้วค่อยๆวนออกรอบๆจุดสัมผัสล่าง ตามรูปร่างของจุดสัมผัสล่าง



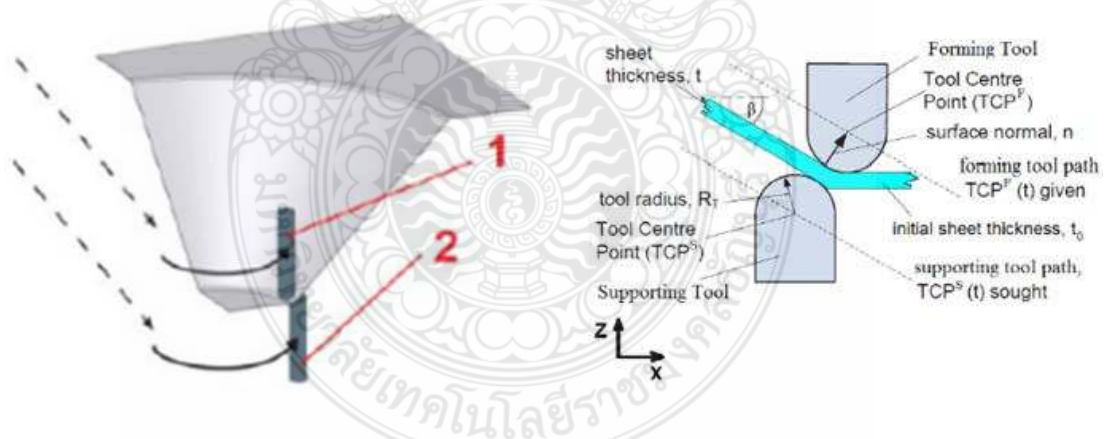
รูปที่ 2.4 การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็ม ทิศทางบวก

- การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็มทิศทางลบ incremental forming with Asymmetrical Negative Support โดยมีหัวกดเคลื่อนเริ่มจากบริเวณขอบของจุดสัมผัสล่างค่อยๆร่อนนอกเข้าสู่ใน ตามรูปร่างของจุดสัมผัสล่าง แสดงดังรูปที่ 2.5



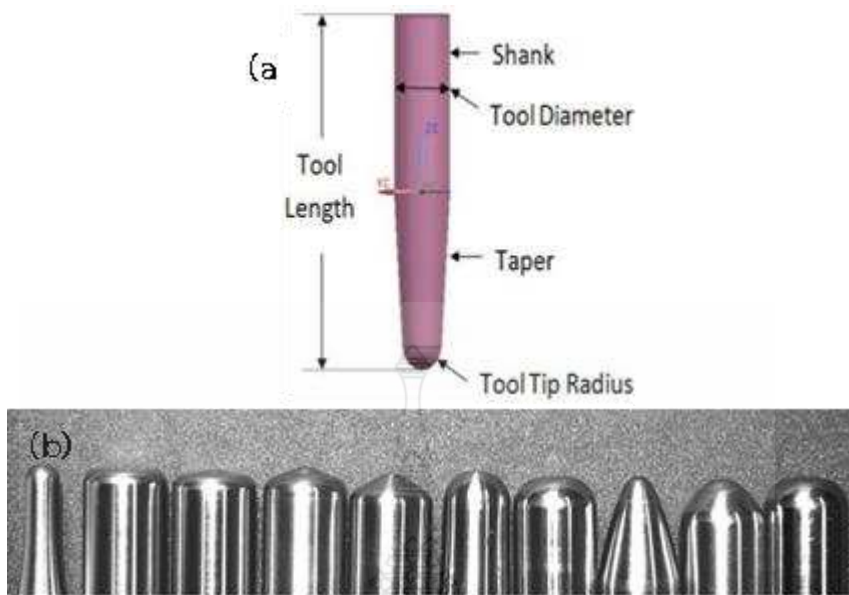
รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็ม ทิศทางลบ

3. การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 2 หัวกดเคลื่อนที่ Two Sided Incremental Forming (TSISF) เป็นการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่มีการเคลื่อนที่ของหัวกด 2 หัว มีหัวกดขึ้นรูป Forming Tool ทำหน้าที่ดันชิ้นงานให้เสียรูปและมีหัวกดประกอง Supporting Tool อีกหัวทำหน้าที่ช่วยในการบังคับการเสียรูปของแผ่นโลหะ [25]



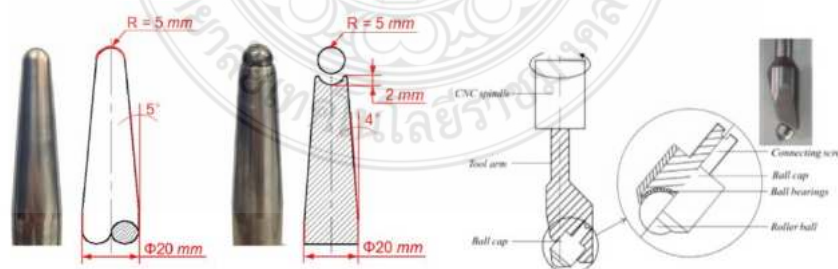
รูปที่ 2.6 การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง 2 จุดสัมผัสแบบมีแท่นรองรับเต็ม ทิศทางลบ

2.2.2 หัวกด Forming tool เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตัดแผ่นโลหะให้เสียรูปแบบถาวร หัวกดจะสร้างจากเหล็กกล้าเครื่องมือกลขึ้นรูปตามต้องการ โดยมีส่วน ประกอบก้าน (Shank) ที่มีขนาด (Tool Diameter) ที่แตกต่างกันตามกำหนด ส่วนเรียว (Taper) และหัวกด (Tool Tip Radius) ซึ่งอาจมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกันหลากหลายตามลักษณะงานที่ต้องการขึ้นรูป



รูปที่ 2.7 (a) ส่วนประกอบของ Forming tool (b) Forming tool ในลักษณะต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีความพยายามพัฒนา Forming tool ในลักษณะต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพของผิวชิ้นงานให้มีความเรียบผิวมากยิ่งขึ้น โดยใช้ Forming tool ที่มี Tool Tip เป็นลูกบอลแข็ง หรือเรียกว่า Roller ball tool จากการศึกษาของ B.Lu, et al. (2014) [22] ที่ศึกษาเปรียบเทียบการขึ้นรูปด้วย Forming tool ที่แตกต่างกัน 3 แบบคือ หัวกดแบบคงที่ (Rigid) หัวกดแบบลูกบอลในแนวตั้ง (vertical rollerball tool: VRB) และหัวกดแบบลูกบอลเฉียง (oblique roller-ball tool: ORB) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่าเมื่อใช้ Roller ball tool สามารถช่วยลดแรงในการขึ้นรูปทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้น กว่าการใช้หัวกดแบบ Rigid และ หัวกดแบบ ORB ให้ความเรียบผิวที่ดีกว่า หัวกดแบบ VRB ดังแสดงในรูปที่ 2.8



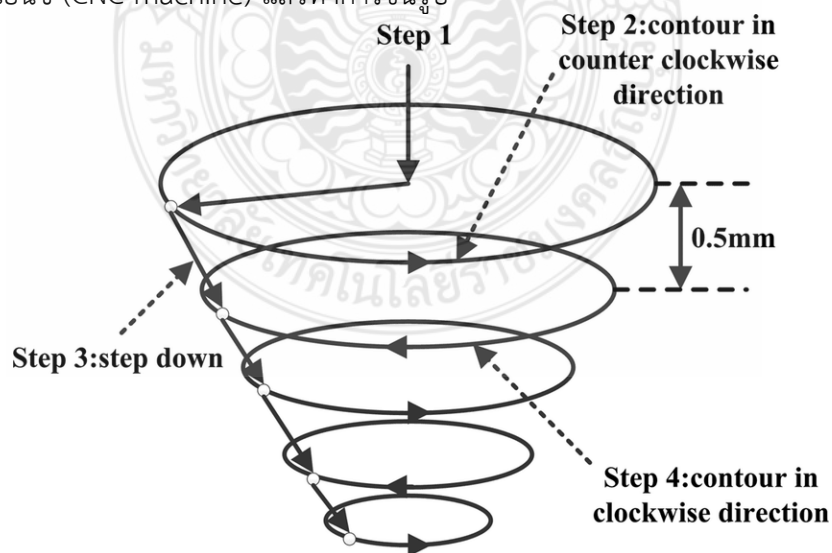
รูปที่ 2.8 ลักษณะของ (vertical rollerball tool : VRB)



รูปที่ 2.9 ลักษณะของ Forming tool (a) Rigid (b) VRB และ (c) ORB

2.3 เส้นทางการเดินของหัวกด Tool path

การสร้างเส้นทางของหัวกดสร้างจากการออกแบบโมเดล 3 มิติ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD : computer aided design) เป็นการสร้างโมเดล 3 มิติตามความต้องการ แล้วนำโมเดล 3 มิติ มาสร้างเส้นทางการเดินของหัวกดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM:Computer Aided Manufacturing) จากการศึกษาของ M. Skjoedt at al. (2007)[28] ได้ศึกษาเส้นทางการเดินของหัวกด พบว่าเส้นทางการเดินของหัวกดเคลื่อนที่แบบ Helical tool path ไม่มีตำนิบริเวณขอบของชิ้นงานและมีความต่อเนื่องของผิวในการขึ้นรูปที่ดี แล้วนำชุดคำสั่ง (G-code&M-code) มาควบคุมเครื่องจักร ซีเอ็นซี (CNC machine) แล้วทำการขึ้นรูป



รูปที่ 2.10 การสร้างเส้นทาง ของหัวกด

2.4 อลูมิเนียมผสม

2.4.1 คุณสมบัติของอลูมิเนียม 5052

อลูมิเนียม 5052 เป็นอลูมิเนียมอัลลอยด์ AL-Mg แมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบหลักในอลูมิเนียมอัลลอยด์ 5052 และเป็นอลูมิเนียมอัลลอยด์ป้องกันสนิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โลหะผสมนี้มีความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานต่อความเมื่อยล้า ความเป็นพลาสติกและความต้านทานการกัดกร่อน แต่ไม่สามารถเสริมความแข็งแรงด้วยกระบวนการทางความร้อน ความเป็นพลาสติกที่ดีในการชุบแข็งงานกึ่งเย็น ความเป็นพลาสติกต่ำในการชุบแข็งงานเย็น ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ความสามารถในการเชื่อม อลูมิเนียม 5052 มีผลการทำสีแบบอะโนไดซ์ที่ยอดเยี่ยม พื้นผิวโลหะและความแข็งของโลหะที่ดีเยี่ยม ความต้านทานการสึกหรอและความต้านทานการกัดกร่อนและอายุการใช้งานที่ยาวนาน มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปลอกโทรศัพท์มือถือ ระเบิดไฮเอนด์ ปลอกเครื่องบิน อากาศ และด้านอื่นๆ ที่ต้องการเอฟเฟกต์อะโนไดซ์สูงและพื้นผิวโลหะ นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับชิ้นส่วนโพลีเมอร์ที่ต้องการความเป็นพลาสติกสูงและความสามารถในการเชื่อมที่ดี และสามารถทำงานในสื่อที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ เช่น ถังเชื้อเพลิงรถยนต์ อลูมิเนียม AA5052 เป็นหนึ่งในเกรดของอลูมิเนียมที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการทำงานทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการผลิตสินค้า อลูมิเนียมรีด AA5052 เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมหลักคืออลูมิเนียม (Al) และแมกนีเซียม (Mg) ทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากอลูมิเนียมชนิดอื่น ส่วนผสมของแมกนีเซียมช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุอลูมิเนียมรีด AA5052 สามารถผ่านกระบวนการ Heat Treatment เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงตามความต้องการ นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของอากาศยาน เนื่องจากมีสมบัติน้ำหนักเบาและความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น การผลิตส่วนประกอบของรถยนต์เพื่อลดน้ำหนักและประหยัดพลังงาน ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุอลูมิเนียม AA5052 แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมและความแข็งแรงของอลูมิเนียม AA5052

Alloy	Element (%wt)								Mechanical properties (MPa)			
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al	F _u	F _y	E	ν
AL5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.21	0.17	0.10	Bal.	335	141	70.52	0.32

ในการทางวิศวกรรมคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการขึ้นรูป ดังนั้นการหาค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุสามารถหาได้จากการนำตัวอย่างโลหะไปทำการทดสอบแรงดึงพร้อมกับการวัดการลดรูปของชิ้นงาน เพื่อให้ได้ค่าพฤติกรรมของวัสดุในสภาวะที่ได้รับแรงกระทำที่ถูกต้อง สำหรับค่า Mechanical Properties แสดงในตารางที่ 2.1 เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมีดังนี้

ค่า F_u คือ Ultimate Tensile Strength (UTS) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงสูงสุดที่วัสดุสามารถทนต่อแรงดึงได้ โดยค่านี้จะแสดงถึงขีดสุดของความแข็งแรงที่วัสดุสามารถรับมือได้ก่อนที่จะเกิดการหักหรือแตก

Fy คือ Yield Strength เป็นค่าที่บ่งบอกขีดจำกัดความแข็งแรงที่วัสดุสามารถเปลี่ยนรูปแล้วดึงกลับได้(deformation) โดยไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวร

E คือ Modulus of Elasticity เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการดึงตัวหรือยืดตัวเมื่อมีการปรับแรงที่กระทำต่อมันในทางคณิตศาสตร์, Modulus of Elasticity ถูกนิยามโดยสัมประสิทธิ์ทางความยืดหยุ่นที่ได้จากสัมประสิทธิ์ต่อตัวของยวบผ่อน (strain) ที่กระทำต่อตัวของวัสดุ

ν คือ Poisson's Ratio หมายถึงหรืออัตราส่วนที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปตัวในทิศทางตั้ง (contraction) เมื่อมีการขยายตัวในทิศทางแนวนอน (extension) หรือถกเถียงกันในทิศทางกลับกัน

ความต้านทานการกัดกร่อนเมื่ออลูมิเนียมอัลลอยด์สัมผัสกับอากาศหรือน้ำ จะเกิดชั้นออกไซด์ขึ้น ชั้นออกไซด์นี้ทำให้โลหะผสมไม่ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่มีฤทธิ์กัดกร่อน อะลูมิเนียม 5052 ไม่มีร่องรอยของทองแดง ดังนั้นจึงยึดเกาะได้ดีเป็นพิเศษภายใต้สภาวะแวดล้อม ไม่สึกกร่อนง่ายเมื่อใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำเค็มซึ่งอ่อนตัวและโจมตีส่วนประกอบของโลหะทองแดง ด้วยเหตุนี้ อะลูมิเนียม 5052 จึงเป็นที่ต้องการมาก ในการใช้งานด้านเคมีและการเดินเรือ เนื่องจากอะลูมิเนียม 5052 มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบ ทั้งคู่จึงต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดจากแอมโมเนีย แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ และกรดไนตริก แต่เมื่อโลหะผสมทั้งสองสัมผัสกับดินที่เป็นต่าง อาจเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า รูพรุณ (Pitting) เพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อน

การเพิ่มความแข็งแรงสามารถกำหนดสัญลักษณ์ในการอบคืนไฟตัวอักษร T หรือ H ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะผสม โดย T คือ การเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการอบชุบ (Heat treatment) และ H คือ การเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด แสดงในตารางที่ 2.3 ยังมีตัวอักษรที่ต่อท้ายในหมายเลขอื่น ๆ เช่น O คือ อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน (Annealed) ตัวอักษร W คือ อลูมิเนียมผสมผ่านกระบวนการอบละลาย และ F คือ As-fabricated ที่ได้จากการผลิต ตัวเลขต่อท้ายตัวอักษร T และ H นั้นแสดงปริมาณการเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด ชนิดการอบชุบ หรือกระบวนการพิเศษอื่นๆ

ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทของอลูมิเนียมชนิดต่างๆ

อลูมิเนียมที่ใช้แรงขึ้นรูป		
1xxx ^a	Commercially pure Al (>99% Al)	ไม่สามารถบ่มแข็งได้
2xxx	Al-Cu and Al-Cu-Li	สามารถบ่มแข็งได้
3xxx	Al-Mn	ไม่สามารถบ่มแข็งได้
4xxx	Al-Si and Al-Mg-Si	สามารถบ่มแข็งได้ถ้ามีแมกนีเซียม
5xxx	Al-Mg	สามารถบ่มแข็งได้
6xxx	Al-Mg-Si	สามารถบ่มแข็งได้
7xxx	Al-Mg-Zn	สามารถบ่มแข็งได้
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, or B	สามารถบ่มแข็งได้
9xxx	Not currently used	

อลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป		
1xx.x. ^b	Al	ไม่สามารถบ่มแข็งได้
2xx.x.	Al-Cu	สามารถบ่มแข็งได้
3xx.x.	Al-Si-Cu และ Al-Mg-Si	สามารถบ่มแข็งได้และไม่สามารถบ่มแข็งได้ขึ้นอยู่กับส่วนผสม
4xx.x.	Al-Si และ Al-Mg-Si	ไม่สามารถบ่มแข็งได้
5xx.x.	Al-Si	ไม่สามารถบ่มแข็งได้
7xx.x.	Al-Mg-Zn	สามารถบ่มแข็งได้
8xx.x.	Al-Sn	สามารถบ่มแข็งได้
9xx.x.	ยังไม่ใช้งาน	

2.4.2 อลูมิเนียมอัลลอยด์รีด (Wrought alloy)

อลูมิเนียมอัลลอยด์รีด (Wrought aluminum alloy) เป็นหนึ่งในประเภทของอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ถูกรีดรูปเพื่อให้ได้รูปลักษณะและคุณสมบัติที่ต้องการในงานต่าง ๆ ซึ่งมีความแตกต่างจากอลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ (Cast aluminum alloy) ที่ถูกหล่อในรูปที่ต้องการโดยไม่ผ่านกระบวนการรีด การรีดอลูมิเนียมอัลลอยด์มีหลายวิธี แต่วิธีที่พบบ่อยคือ Extrusion (อัดขึ้นรูป) และ Rolling (รีด) กระบวนการ Extrusion เป็นกระบวนการที่อลูมิเนียมอัลลอยด์ถูกดันผ่านหลอดรูปพิเศษโดยใช้แรงดันสูงผ่านกระบวนการนี้ อลูมิเนียมอัลลอยด์จะได้รูปทรงตามรูปของหลอด Extrusion มีประโยชน์ในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงที่ซับซ้อน ไม่ว่าจะเป็นเพรีฟิล ลูกโป่ง หรือรูปอื่นๆ กระบวนการ Rolling เป็นกระบวนการที่อลูมิเนียมอัลลอยด์ถูกทำแบนโดยให้ผ่านระหว่างลูกกลิ้งกระบวนการนี้ช่วยให้ได้แผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีความหนาและความกว้างตามต้องการ Rolling เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการผลิตแผ่นอลูมิเนียมสำหรับงานก่อสร้าง การทำภาชนะ แผ่นพับ และอื่นๆ การเลือกใช้ Extrusion หรือ Rolling ขึ้นอยู่กับลักษณะและข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอลูมิเนียมอัลลอยด์รีดมักถูกนำมาใช้ในหลายอุตสาหกรรมเช่น ยานยนต์, อาหาร, การก่อสร้าง, และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรง และความคงทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติอลูมิเนียมผสม

F	As-fabricated
O	Annealed (การลดความแข็ง)
H	Strain Hardened(ความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากความเครียด) , Cold-worked(การขึ้นรูปเย็น)
H1	แสดงเฉพาะความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากความเครียด
H2	ความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากความเครียดและเกิดจากการอบอ่อน
H3	ความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากความเครียด โดยการอบอ่อนที่เหมาะสม
	H16- การทำงานแบบเย็นที่ให้ความแข็งแรงในการดัดดิ่งตามกลางระหว่างสภาวะ H14 และ H18

	H18- การทำงานแบบเย็นที่ให้การลดลงประมาณ 75%
	H19- การทำงานแบบเย็นที่ให้ความแข็งแรงในการดึงที่มากกว่า 2,000 psi ของค่าที่ได้จากการปรับอาร์ม H18
	H2 _x - การทำงานแบบเย็นและการอบอ่อนบางส่วน
	H3 _x - การทำงานแบบเย็นและทำให้เสร็จสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันการบวมแข็งตามอายุของโครงสร้าง
W	รักษาอุณหภูมิสูงเพื่อปรับโครงสร้าง
T	กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)
	T1-ปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ และบ่มแข็งธรรมชาติ
	T2-ปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ (Cold-worked)
	T3-ทำการอบละลายปล่อยให้เย็นตัวต่อการบ่มแข็ง (Naturally Aged)
	T4-ทำการอบละลายต่อการบ่มแข็งให้ความแข็งคงตัว
	T5-ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในสภาพเดิม ต่อด้วยการบ่มแข็งเทียม (Artificially aged)
	T6-ทำการอบละลาย ต่อด้วยการจุ่มชุบ และทำการบ่มแข็งเทียม
	T7-ทำการอบละลาย และ การอบคงสภาพ (Stabilized)
	T8-ทำการอบละลายและปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ ต่อด้วยการบ่มแข็งเทียม
	T9-ทำการอบละลาย ต่อด้วยการบ่มแข็งเทียมและปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ
	T10- ปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ ต่อด้วยการบ่มแข็งเทียม

(ที่มา : Donald R Askeland, and Pradeep Prabhakar Phulé, The Science and Engineering of Materials (Springer, 2006)

2.5 วัสดุทำเครื่องมือในการกดขึ้นรูป

เหล็กกล้าเครื่องมือมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น วัตถุประสงค์หลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และ โมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณคาร์ไบด์ในระดับสูงและโครงสร้างเทมเปอร์มาเทนไซต์ภายหลังการชุบแข็งและอบคืนตัว (Tempering) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการกลึง กัด ตัด ไส ที่ต่ำและมีความเหนียวลดลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่นซึ่งมีคุณสมบัติเด่น ๆ ดังนี้

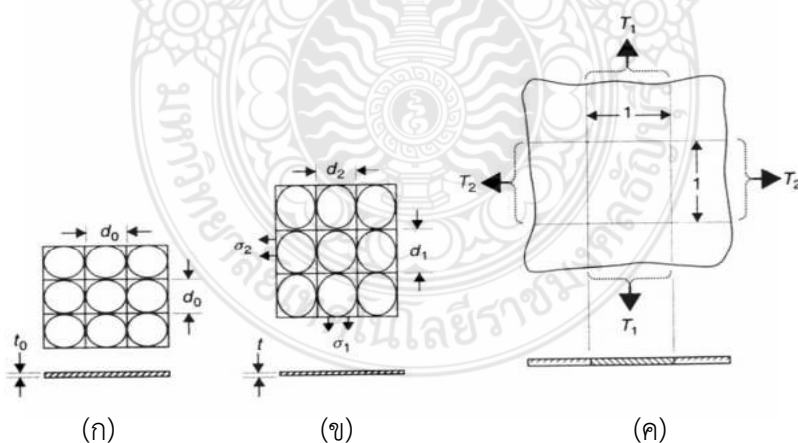
1. มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมาก
2. มีความเหนียวแรงพอใช้
3. ชุบแข็งได้ลึกมาก มีความสามารถในการชุบแข็งสูงมาก และชุบแข็งในเตาสู่ญญากาศได้
4. ต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี
5. เกิดการบิดงอเล็กน้อยมากหลังการชุบแข็ง
6. ต้านทานการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ต่ำ
7. สามารถทำไนไตรดิงหลังการชุบแข็งได้

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก JIS SKD 11

ส่วนผสมทางเคมี(%wt.)	C	Cr	Mo	V
	1.55	12.0	0.7	1.0
AISI	D2			
JIS	SKD-11			
DIN	1.2379/x155 CrVMo12-1			
สภาพจำหน่าย	อบอ่อนความแข็งสูงสุด 250 HB			
สภาพหลังชุบ	ชุบแข็งและอบคืนตัว 58 – 62 HRC			

2.6 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

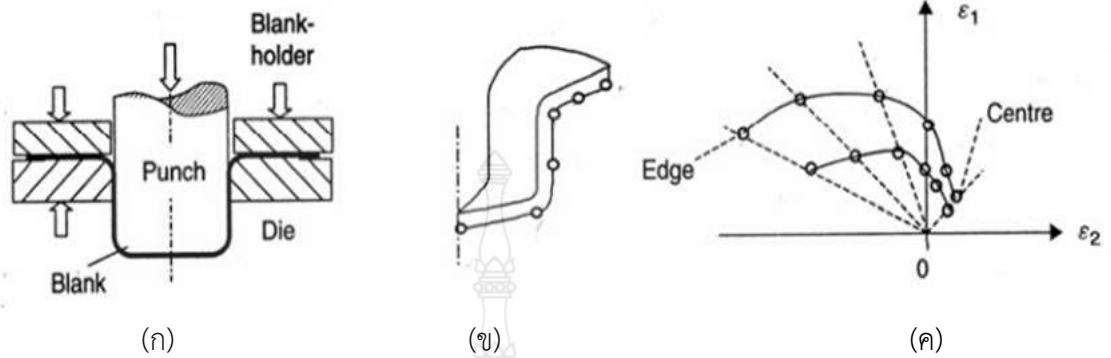
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ในรูปที่ 2.11 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังรูปที่ 2.11 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.11 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณี ดังรูปที่ 2.11 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [13]



รูปที่ 2.11 (ก) วงกลมบนโลหะแผ่น ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรองคือ d_2 (ค) การดึง, T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง

2.7 แผนภาพความเครียด (Strain diagram)[9]

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น สามารถวัดได้จากกริดวงกลมในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.12 (ก) การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก (ข) ขึ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก

2.7.1 ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)[9]

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} ; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} ; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

2.7.2 อัตราส่วนของความเครียด (Strain ratio) [9]

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

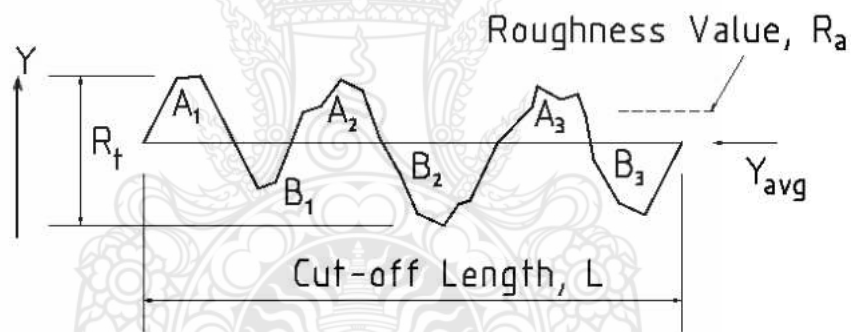
$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right)} \quad (2)$$

2.8 ความหยาบผิว

ความหยาบผิวและวิธีการวัดค่า (surface roughness)

ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการผลิตด้วยกรรมวิธีต่าง เช่น กระบวนการหล่อ, กระบวนการรีดขึ้นรูป, กระบวนการกัดอัดขึ้นรูป และกระบวนการปาดผิวด้วยเครื่องมือกล ผิวที่ออกจากกระบวนการเหล่านั้น เมื่อนำมาขยายจะพบว่าผิวงานที่ออกมานั้นมีลักษณะ ขรุขระเป็นคลื่นสูง ต่ำไม่เท่ากัน อันเนื่องมาจากความไม่ถูกต้องทางเรขาคณิต ของกระบวนการผลิตผิวหน้ากับความหยาบ (Roughness) ซึ่งเป็นความไม่สม่ำเสมอหรือความไม่ถูกต้องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้จากกระบวนการผลิต หนึ่งในปัญหาหลายอย่างของการวัดความหยาบของผิวหน้าก็คือ การแยกความเป็นคลื่น ออกจากความหยาบ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการจำกัดการตรวจสอบของผิวหน้าของชิ้นงานเป็นช่วงความยาวหนึ่งเราเรียกว่าความยาวคลื่นตัดมาพิจารณา Cut-off wavelength ซึ่งมีการกำหนดเป็นมาตรฐาน ISO 4287:1997 ให้มีระยะความยาวคลื่นตัดเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 0.8 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร การวัดค่าความหยาบของผิวขึ้นงารตามมาตรฐานของ ISO 4287:1997 มีหน่วยวัด 3 ค่าได้แก่ Rt, Ra และ Rz เท่านั้น

การหาค่าความหยาบ Rt คือค่าวัดจากตำแหน่งสูงสุดถึงตำแหน่งต่ำสุดของระยะความยาวคลื่นตัด ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (um)



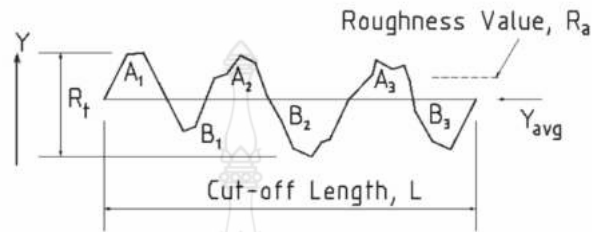
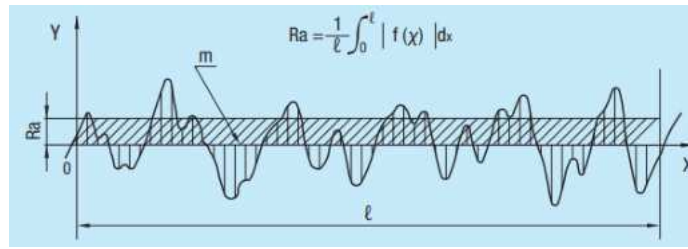
รูปที่ 2.13 แสดงพื้นที่เหนือเส้นศูนย์กลางและใต้เส้นศูนย์กลาง

การหาค่าความหยาบ Ra คือค่าความหยาบผิวที่หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง ทารด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (um)

$$R_a = \frac{(A_1 + A_2 + A_3 + \dots) + (B_1 + B_2 + B_3 + \dots)}{L} \quad (3)$$

หรือ

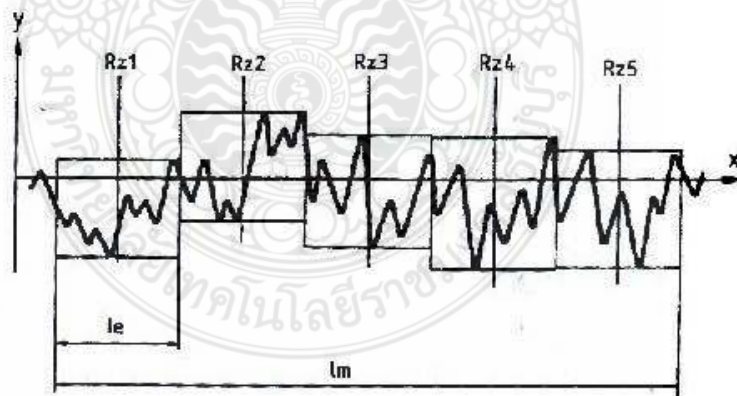
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y - \bar{y}| dl, \quad (R_a = \frac{\sum_i A_i + \sum_j A_j}{L}) \quad (4)$$



รูปที่ 2.14 การวัดค่าความหยาบผิว

การหาค่าความหยาบ Rz หมายถึง ค่าความหยาบผิว ซึ่งหาได้จากการวัดวันสูงได้จากการวัดตำแหน่งสูงสุดถึงตำแหน่งต่ำสุดของแต่ละช่วงที่วัดแต่ละช่วงเท่า ๆ กัน ใน 5 ช่วง แล้วนำค่าความสูงทั้ง 5 ช่วงมาเฉลี่ยจะได้ค่าความหยาบ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (um)

$$R_z = \frac{(R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5})}{5} \quad (5)$$

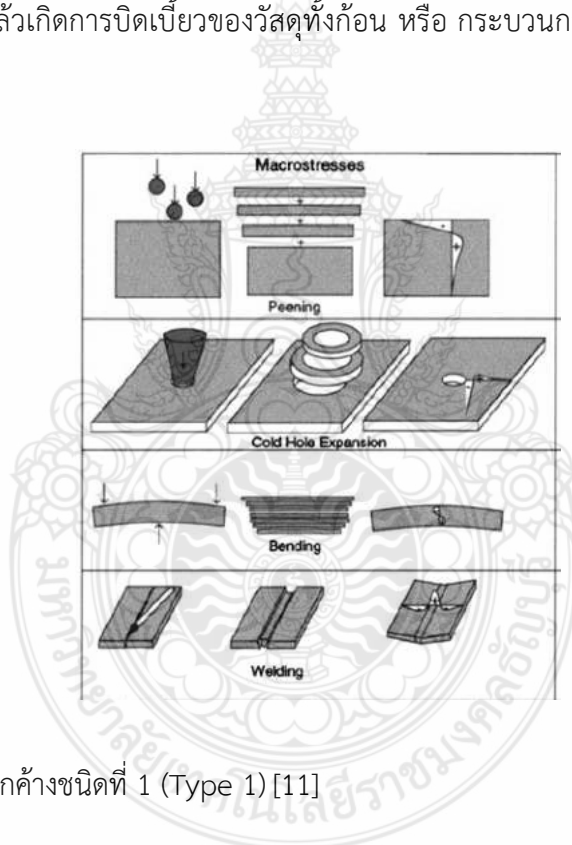


รูปที่ 2.15 การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นที่ผิว

2.9 ความเค้นตกค้าง

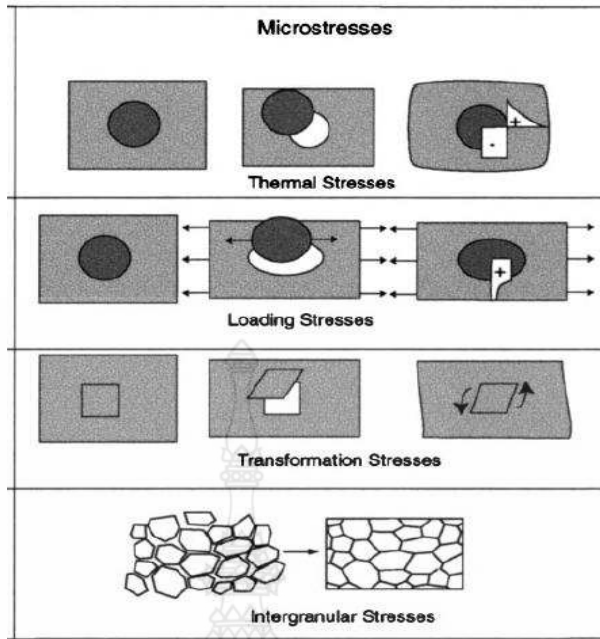
ความเค้นตกค้าง มีความสัมพันธ์กับแรง (Forces) และ แรงคู้ควบ (Moments) ซึ่งมีอยู่ในสภาวะสมดุลภายในวัสดุในการขึ้นรูปโลหะผ่านการเปลี่ยนรูอย่างยืดหยุ่น (Elastic deformation) และหรือ การเปลี่ยนรูอย่างถาวร (Plastic deformation) ที่เกิดขึ้นกระจายอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอในแผ่นโลหะ ภายใต้การแบ่งระดับรูปแบบของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ความเค้นตกค้างจะมีค่า เป็นค่าคงที่ ซึ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์และบอกปริมาณความเค้นตกค้าง [12-15] สามารถแบ่งการบอกปริมาณความเค้นตกค้างเป็น 3 ชนิด ตามระดับขนาดสเกล (Scale) ดังนี้

1. ความเค้นตกค้างชนิดที่ 1 (Type 1) เป็นความเค้นตกค้างระดับมหภาค (Macro residual stress) ซึ่งเป็นค่าคงที่โดยเฉลี่ยตลอดช่วงโครงสร้างจุลภาคระดับช่วงหลายเกรน (Grains) รวมทั้งขอบเกรน (Grain boundary) ด้วย และอยู่ในสมดุลภายในปริมาตรเนื้อวัสดุทั้งหมด เช่น กระบวนการเชื่อมโลหะสองแผ่นติดกันแล้วเกิดการบิดเบี้ยวของวัสดุทั้งก้อน หรือ กระบวนการขัดผิว ด้วยการยิงอนุภาค (Shot peening)



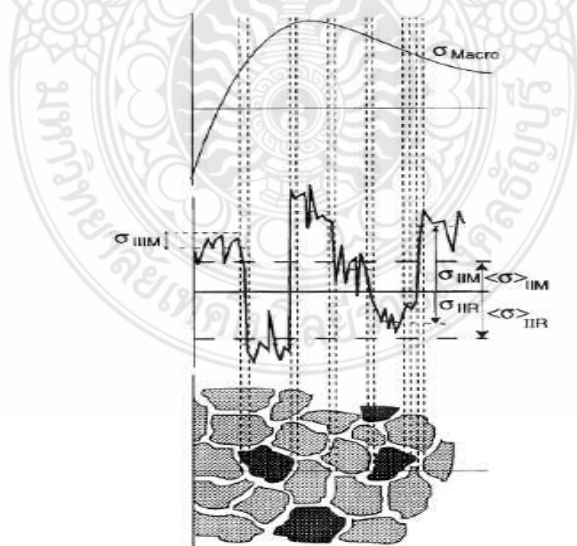
รูปที่ 2.16 ความเค้นตกค้างชนิดที่ 1 (Type 1) [11]

2. ความเค้นตกค้างชนิดที่ 2 (Type 2) เป็นความเค้นตกค้างในระดับจุลภาค (Micro residual stress) ซึ่งเป็นค่าคงที่โดยเฉลี่ยของโครงสร้างจุลภาคระดับผลึก (Crystal structure) หนึ่งๆ ซึ่งจะอยู่ในสมดุลช่วงผลึกหลายผลึก เช่น ความเค้นตกค้างที่เกิดจากพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น และพลาสติกของวัสดุ รวมถึงพฤติกรรมขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion) ที่แตกต่างกันของแต่ละโครงสร้างผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) ของวัสดุโครงสร้างแบบพหุผลึก (Polycrystalline material)



รูปที่ 2.17 ความเค้นตกค้างชนิดที่ 2 (Type 2) [11]

3. ความเค้นตกค้างชนิดที่ 1 (Type II) เป็นความเค้นตกค้างในระดับจุลภาค (Micro residual stress) ในระดับสเกลอยู่ภายในระดับอะตอม (Atomic Scale) ได้แก่ ความผิดปกติของ โครงสร้างผลึก เช่น การเกิดการแทรกตัวของอะตอมอื่นในโครงสร้างของวัสดุ (Interstitial) การเกิดดิสโลเคชัน (Dislocation) เป็นต้น



รูปที่ 2.18 ชนิดของความเค้นตกค้างแบ่งตามระดับสเกล (Scale) โดยที่อักษรกรรชนิตัวห้อย M แทน เฟสเนื้อพื้น และ R แทน เฟสวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) [11]

ความเค้นตกค้างสามารถเกิดได้จาก 3 สาเหตุ ได้แก่

ก) ภาระทางกลภายนอก (Applied mechanical load) เช่น กระบวนการขัดผิวด้วยการยิงอนุภาค (Shot peening) กระบวนการขึ้นรูปโลหะ งานปั๊มขึ้นรูป งานพับ งานดัดโค้ง

ข) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal residual stress) เช่น การบิดเบี้ยวของโครงสร้างวัสดุหลายเฟสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal) เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแต่ละเฟสไม่เท่ากัน เช่น กระบวนการ เชื่อมโลหะแบบหลอมละลาย กระบวนการชุบแข็ง

ค) การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ (Phase transformation) ซึ่งปริมาตรหรือโครงสร้างเฟสที่เปลี่ยนไป ซึ่งอาจจะเกิดจากการแพร่ของอะตอมจากเฟสข้างเคียงหรือจากสิ่งแวดล้อมอื่นเข้ามาแทรกอยู่ในโครงสร้าง (Physical absorption) เช่น กระบวนการอบชุบโลหะ

มีการศึกษาความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิและรวบรวมแบบจำลองความเค้นตกค้าง ในวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกในงานวิจัยของ Francisco C Serbena [16] สำหรับวัสดุเนื้อพื้นเซรามิกที่มีเฟสเล็กๆทรงกลมกระจายอยู่ในเนื้อพื้น (Particles dispersion in ceramic matrix) มีแบบจำลอง

2.10 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบน The X-ray diffraction technique

เครื่องจักรที่ใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบน X-Ray Diffractometer Model XRD 6100 2kw Shimadzu โดยใช้รังสี $\alpha - Cu$ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 60 kV และ 80 mA พร้อมตัวเป้าเป็นนิกเกิล $K - \beta$ การทดสอบระนาบการเลี้ยวเบน 2θ มุมการเลี้ยวเบนมากกว่า 120° เพื่อระบุมุมยอดสูงสุด โดยทำการสแกนตั้งแต่มุม $20^\circ - 80^\circ$ การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ TISF ทำการหาปริมาณความเค้นตกค้างโดยการวัดความเครียดแบบสม่ำเสมอ (Uniform Strain) จากการเปลี่ยนช่วงความกว้าง (Peak Broadening) ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของยอดความเข้ม ทำการเลือกใช้เทคนิคของ Williamson-Hall : FWHM โดยการพิจารณาความเครียดจากช่วงความกว้างของยอดตามมุม 2θ โดยที่ความเครียดจุลภาคสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) โดยที่ β_T คือ ช่วงความกว้างของยอดความเข้ม β_D คือ การเปลี่ยนช่วงความกว้างของยอดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึก และ β_ϵ คือ การเปลี่ยนช่วงความกว้างของยอดจากการเปลี่ยนแปลงความเครียด

$$\beta_T = \beta_D + \beta_\epsilon \quad (6)$$

โดยที่ขนาดของผลึก Crystallite size: β_D คำนวณจากสมการของ Scherrer formula ดังแสดงในสมการที่ (7) ซึ่ง k is a dimensionless shape factor has a value of about 0.9, λ

คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับ 1.54056 nm, D คือ Crystallite size และ 2θ คือ Diffraction angle

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_D \cos\theta} \quad \text{or} \quad \beta_D = \frac{k\lambda}{D \cos\theta} \quad (7)$$

แต่กรณีความเครียดจุลภาคสามารถคำนวณจากสมการ $\beta_\varepsilon = 4\varepsilon \tan\theta$

ดังนั้น

$$\beta_T = \frac{k\lambda}{D \cos\theta} + 4\varepsilon \tan\theta \quad (8)$$

โดยที่ $\tan\theta = \sin\theta / \cos\theta$ จากนั้นจึงนำไปแทนค่าในสมการที่ (8) จะได้สมการดังสมการที่ (9)

$$\beta_T = \frac{k\lambda}{D \cos\theta} + 4\varepsilon \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \quad (9)$$

ทำการแก้สมการโดยนำ $\cos\theta$ คูณทั้งสองข้าง จะได้สมการที่ (10) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการความชัน $y = mx + c$ โดยที่ $\beta_T \cos\theta = y$, $\varepsilon = m$, $4\sin\theta = x$ และ $k\lambda/D = c$

$$\beta_T \cos\theta = \varepsilon(4\sin\theta) + \frac{k\lambda}{D} \quad (10)$$

ทำการคำนวณความเค้นตกค้างจากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการปรับสมการเส้นตรงด้วยกำลังสองน้อยสุด (Least square fit) จากกราฟ $\beta_T \cos\theta$ กับ $4\sin\theta$ แล้วใช้สมการที่ (11) สำหรับการคำนวณค่าความเค้นตกค้าง โดยที่ σ_ϕ คือ ความเค้นหลังการขึ้นรูป, E คือ Modulus of Elastic, ν คือ Poisson's ratio และ m คือ ค่าความชันจากการปรับสมการเส้นตรง ระหว่าง $\beta_T \cos\theta$ กับ $4\sin\theta$

$$\sigma_\phi = \left(\frac{E}{\nu + 1} \right) m \quad (11)$$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบ 2 จุด จุดเด่นในการทดลองนี้เป็นกระบวนการนี้คือความยืดหยุ่นในการขึ้นรูป และสามารถใช้งานกับการขึ้นรูปที่มีความซับซ้อนได้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

จากการศึกษาของ B.Lu, at al. (2014) [22] การพัฒนา Forming tool ในลักษณะต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพของผิวชิ้นงานให้มีความเรียบผิวมากยิ่งขึ้น โดยใช้ Forming tool ที่มี Tool Tip เป็นลูกบอลแข็ง หรือเรียกว่า Roller ball tool จากการศึกษาของ B.Lu, at al. (2014) [29] ศึกษาเปรียบเทียบการขึ้นรูปด้วย Forming tool ที่แตกต่างกัน 3 แบบคือ หัวกดแบบคงที่ (Rigid) หัวกดแบบลูกบอลในแนวตั้ง (vertical rollerball tool : VRB) และหัวกดแบบลูกบอลเฉียง (oblique roller-ball tool : ORB) ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อใช้ Roller ball tool สามารถช่วยลดแรงในการขึ้นรูปทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้น กว่าการใช้หัวกดแบบ Rigid และ หัวกดแบบ ORB ให้ความเรียบผิวที่ดีกว่า หัวกดแบบ VRB

Ajay Kumar, at al. ได้ทำการตรวจสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อความหยาบผิวในกระบวนการ Incremental Sheet Forming (ISF) สำหรับแผ่น AA2024-O ผลการศึกษาพบว่าความหยาบของผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องมือลดลง และเครื่องมือปลายครึ่งวงกลมให้คุณภาพพื้นผิวที่ดีขึ้นของส่วนประกอบที่ขึ้นรูปเมื่อเทียบกับเครื่องมือปลายแบน

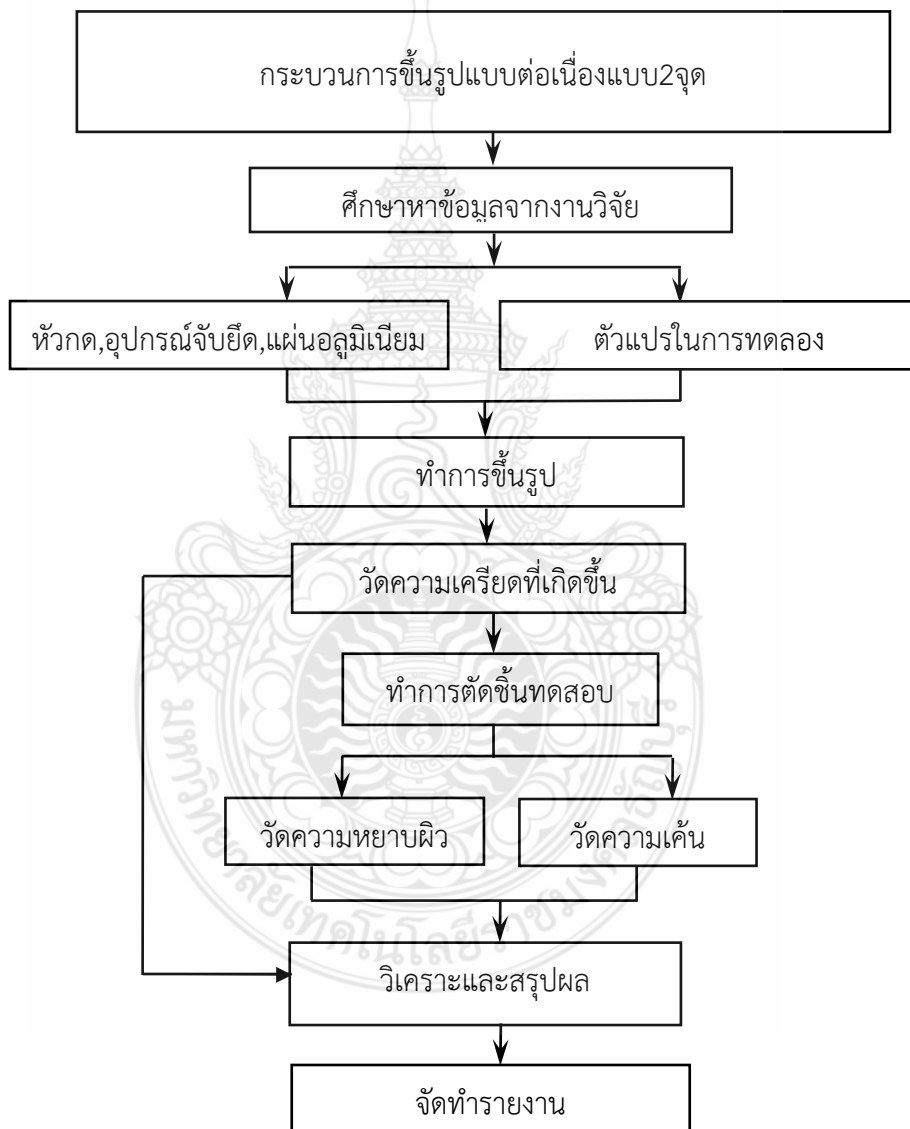
J. León, at al. ได้วิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์และรูปร่างของที่ของชิ้นงานต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการ Incremental Sheet Forming (ISF) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ ISF และเปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะอื่นๆ

Amir Ali Nourmohammadi, at al. ได้สำรวจการใช้แม่พิมพ์ แบบหลายจุดที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ใหม่ใหม่ได้และโครงสร้างรองรับ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของการขึ้นรูปแบบสองจุด (TPIF) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นอะลูมิเนียมที่มีพื้นผิวรูปทรงอิสระ การตรวจสอบเชิงทดลองและเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์หลายจุดช่วยให้สามารถผลิตชิ้นส่วนสมมาตรและอสมมาตรต่างๆ ที่มีขนาดและรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันด้วยความแม่นยำที่ยอมรับได้ การเพิ่มแผ่นยางระหว่างหมุดและแผ่นอะลูมิเนียมช่วยปรับปรุงคุณภาพพื้นผิว และการเพิ่มความแข็งของแผ่นยางช่วยเพิ่มความหนาขั้นต่ำและความแม่นยำของชิ้นงาน

Le Van Sy, at al. การศึกษานี้ศึกษาผลกระทบของสารหล่อลื่นและวิธีการหล่อลื่นต่อคุณภาพพื้นผิวและความแม่นยำทางเรขาคณิตในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นส่วนเพิ่ม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารหล่อลื่นแบบผสมช่วยปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวและความแม่นยำทางเรขาคณิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่น้ำมันพืชเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยมีคุณภาพพื้นผิวใกล้เคียงกับน้ำมันเครื่อง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นการทดลองขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อเนื่องแบบ 2 จุด เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบผิว และความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานหลังทำการขึ้นรูปของกระบวนการขึ้นรูปอลูมิเนียมแผ่น AA5052 ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยวิธีการหมุนหัวกด โดยมีตัวแปรได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนหัวกด และระยะความลึกของหัวกด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1



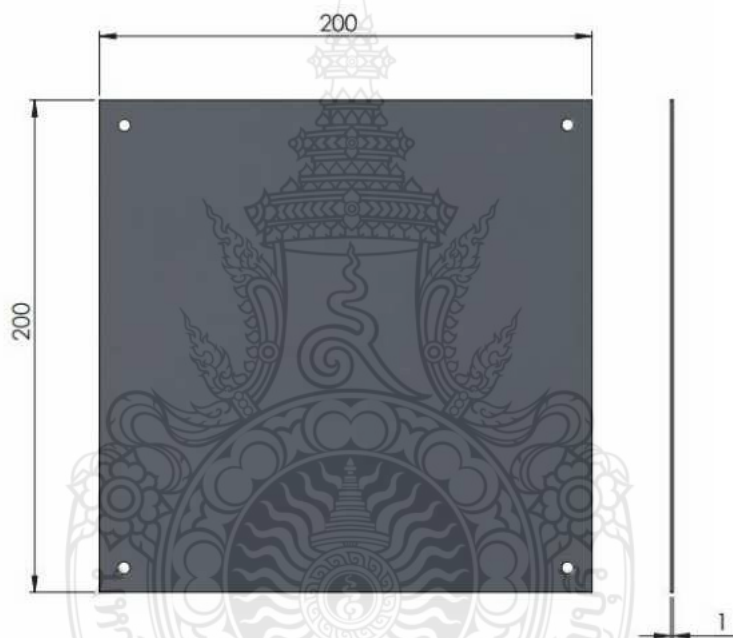
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย

3.1 กระบวนการทดสอบ

ในกระบวนการทดสอบผู้วิจัยได้เตรียมชิ้นงาน AA5052 ด้วยการตัดให้ได้ขนาดตามที่กำหนดแล้ว จากนั้นทำการกัดผิวของชิ้นงานด้วยเทคนิคตารางวงกลมไว้เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตารางวงกลม จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด จากนั้นจะนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปไปวิเคราะห์ศึกษาโครงสร้างผลึกและศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อความเรียบผิวและความเค้นตกค้างในวัสดุ ตามกระบวนการต่อไปนี้

3.1.1 เตรียมชิ้นงาน

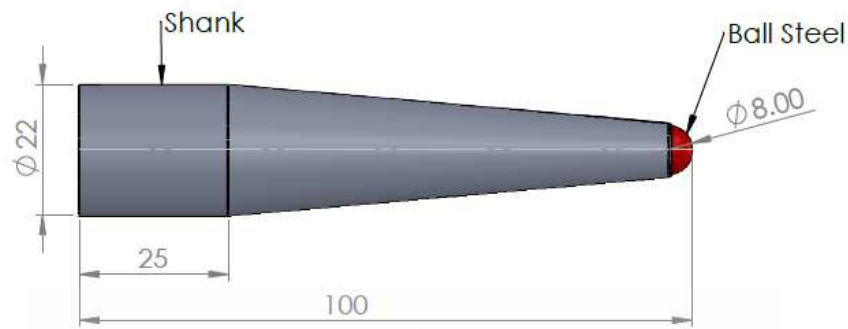
เตรียมชิ้นงานทดสอบ แผ่นอลูมิเนียม AA5052 ทหนา 1 มิลลิเมตร ทำการตัดให้มีขนาดความกว้าง 200 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบ อลูมิเนียม AA5052

3.1.2 การเตรียมหัวกด

ในการเตรียมหัวกด วัสดุในส่วนของก้านทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11ตามมาตรฐาน JIS ทำการกลึงขึ้นรูป โดยให้ขนาดของบริเวณจับยึดหัวกดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมด 100 มิลลิเมตร บริเวณปลายหัวกดมีการกัดขึ้นเป็นหลุมโค้งเพื่อให้พอดีกับ ลูกบอลเหล็กยี่ห้อ NTN Bearings ขนาด 8 มิลลิเมตร โดยลักษณะของหัวกดจะแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 หัวกดขึ้นรูป

3.1.3 อุปกรณ์จับยึดแผ่นโลหะ

การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับยึดแผ่นโลหะในกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด โครงสร้างทำจากเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร กัดขึ้นรูป มีเสา 4 ต้นทำจากสลักชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร ปลอกกรองเลื่อนทำจากทองเหลืองทำให้การไหลขึ้นเป็นไปอย่างง่ายดาย ระบบจับยึดด้วยสกรู M6 แบบหัวจมทั้งหมด 26 ตัว ผ่านแคมป์ 4 ชั้น เพื่อให้การจับยึดมั่นคงแข็งแรง ฐานรองรับเฉพาะจุดทำจากเหล็ก S45C กลึงปาดหน้าลดคม R5 บริเวณขอบและยึดด้วยสกรู M8 แบบหัวจม



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดโลหะแผ่นในกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการออกแบบการทดลอง (DOE: Design of Experiment) ทางผู้วิจัยได้ใช้วิธีออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิ (Taguchi) แบบแนวฉาก(Orthogonal) L9 และทำการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรในการทดลองด้วยเทคนิค Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio) เพื่อหาตัวแปรในการขึ้นรูปที่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวและความเค้นตกค้างของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูป โดยในการทดลองขึ้นรูปมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนหัวกด และความลึกของหัวกด

3.2.2 ทากูชิ (Taguchi Method)

ในการทดลองผู้วิจัยใช้เทคนิคทากูชิ แบบแนวฉาก โดยใช้เทคนิคการทดลอง 9 ครั้ง โดยแต่ละในแถวของตัวแปรในตาราง การกำหนดตัวแปรในการทดลองจะไม่ซ้ำกัน โดยตารางที่ 3.2 จะแสดงลำดับของการทดลองที่ออกแบบด้วยเทคนิคทากูชิแบบแนวฉาก L9

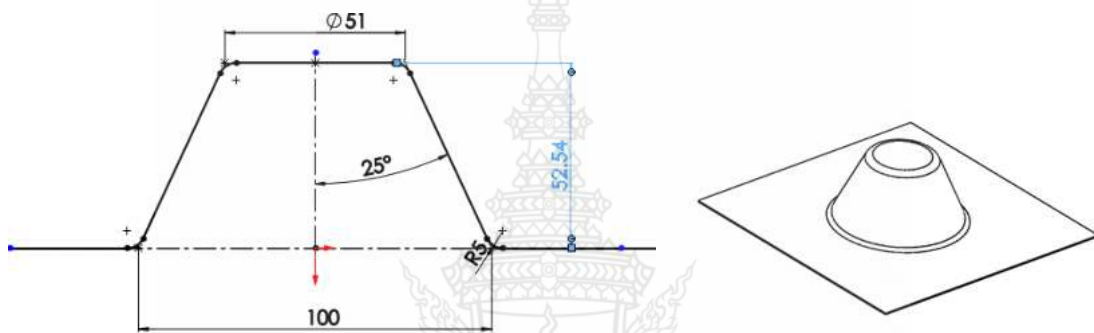
ตารางที่ 3.1 ลำดับในการทดลองขึ้นรูปที่ออกแบบด้วยเทคนิค Taguchi Orthogonal L9

No.	ความเร็วรอบในการหมุน (rpm.)	ความลึกในการกด (mm.)
1	0	0.3
2	0	0.5
3	0	0.7
4	500	0.3
5	500	0.5
6	500	0.7
7	1000	0.3
8	1000	0.5
9	1000	0.7

หลังจากการทดลองตามลำดับในตารางที่ 3.2 จะนำผลจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเรียบผิวและความเค้นตกค้างของชิ้นงานด้วย วิธีการตอบสนองของค่า Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio) เป็นกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรในการทดลองด้วยอัตราส่วนสัญญาณรบกวน S/N Ratio โดยผู้วิจัยนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบของ 2 ตัวแปร ซึ่งได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนหัวกด และความลึกของหัวกดว่าส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวและความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่ผ่านการทดลองด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด

3.2.3 การออกแบบรูปทรงและตัวแปรปรับตั้งในการขึ้นรูป

ในการทดลองจะใช้การขึ้นรูปรูปทรงกรวยตัดมีขนาด ในการทดลองจะมีการกำหนดเส้นทางการเดินของหัวกดขึ้นรูป โดยเริ่มจากการออกแบบโมเดล 3 มิติ การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป (Angle forming) ความเร็วในการหมุนของหัวกดที่ใช้ในการขึ้นรูป (Rotation Speed) ความเร็วของหัวกดที่เคลื่อนในการขึ้นรูป (Traverse Speed) และรูปแบบของเส้นทางการเดินแบบ Helical tool path ในขั้นตอนนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการผลิต SOLID CAM 2016 ในการสร้างเส้นทางการเดินของหัวกดและการปรับตั้งตัวแปรในการขึ้นรูป



Process parameter

Width(mm.)	1
Diameter (mm.)	100
angle (degree)	25
step down	0.3,0.5,0.7
Feed (mm./min.)	1000
Speed (rpm./min.)	0,500,1000

รูปที่ 3.5 แสดงขนาด มุมและตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป

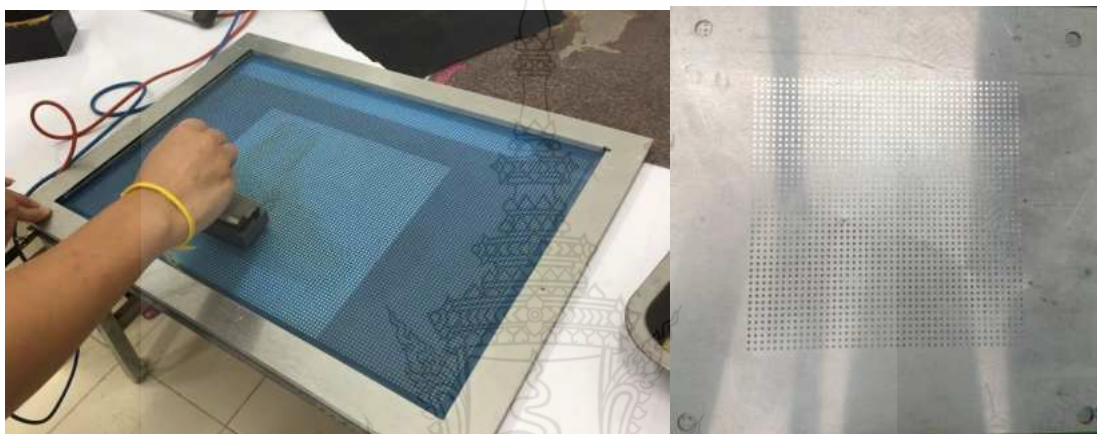
ในการทดลองจะมีการกำหนดตัวแปรในการทดลองและทำการขึ้นรูปตามข้อมูลในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด

ความเร็วรอบของหัว กครอบต่อนาที	ระยะลึกในการขึ้นรูป step down		
	0.3มิลลิเมตร	0.5มิลลิเมตร	0.7มิลลิเมตร
0	/	/	/
500	/	/	/
1000	/	/	/

3.3 การวิเคราะห์ตารางวงกลม (Grid circle analysis)

กระบวนการวิเคราะห์ตารางกริดวงกลม เป็นกระบวนการศึกษาการเปลี่ยนรูปของวัสดุ โดยสังเกตจากการที่ตารางวงกลมเปลี่ยนไป โดยก่อนจะเริ่มทดลองทำการขึ้นรูป จะทำการกัดผิววัสดุ บริเวณที่จะขึ้นรูปเป็นตารางวงกลมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังรูปที่ 3.6 ผิววัสดุที่จะถูกกัดอย่างรวดเร็ว จะเกิดเป็นตารางวงกลมตามผิวของแผ่นชิ้นงาน ตามด้วยทำการวัดขนาดของวงกลม และแปรผลเป็นความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน ด้วยทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของวงกลม



รูปที่ 3.6 การกัดผิววัสดุเป็นตารางวงกลมด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การสร้างตารางวงกลมจะกำหนดให้วงกลมมีขนาด 1.5 มิลลิเมตร และระยะห่างของวงกลม 3 มิลลิเมตร โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์รวมกับการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการเร่งการกัดผิวชิ้นงาน โดยนำแผ่นรองชิ้นงานมารองชิ้นงานบนโต๊ะปฏิบัติการแล้วเชื่อมขั้วแอโนดเข้ากับแผ่นโลหะที่รองชิ้นงานด้านล่าง จากนั้นเชื่อมขั้วแคโทดเข้ากับแท่งขั้วกราดไฟต์โดยมีฟองน้ำในการซับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วนำแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบจะต้องผ่านการแต่งครีบและขอบ พร้อมกับล้างคราบมันให้สะอาด แล้วเช็ดให้แห้ง ระวังอย่าให้มีเศษโลหะหรือวัสดุใดๆวางบนแผ่นโลหะ นำแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) วางบนชิ้นงานโดยจัดให้เหมาะสมกับชิ้นงานนำแท่งขั้วกราดไฟต์มาเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้พอดี แล้วทำการเปิดสวิตช์เครื่องจ่ายไฟฟ้า ปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม แล้วนำแท่งขั้วกราดไฟต์มาถูบนชิ้นงานในบริเวณที่ต้องการสร้างตารางวงกลม โดยเคลื่อนที่แท่งขั้วกราดไฟต์ไปอย่างช้าๆ และสังเกตชิ้นงานจะมีรูวงกลมค่อยๆชัดขึ้น หลังจากเสร็จแล้วให้นำแผ่นชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาดและเช็ดให้แห้ง เพื่อรอการขึ้นรูปต่อไป

3.4 วิธีการขึ้นรูป

การทดลองจะขึ้นรูปโดยใช้ เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกนโดยมีการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดแผ่นโลหะและการกำหนดตำแหน่งของแผ่นโลหะ แล้วตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ แล้วเริ่มการขึ้นรูปตามตัวแปรที่ออกแบบไว้ทุกขั้นตอน จนเสร็จ และถอดชิ้นงานออกอย่างระมัดระวัง จากนั้นทำการวัดความหนาผิว ความเค้นตกค้าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) การติดตั้งชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป (ข) อุปกรณ์จับยึดแผ่นชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปนำมาตัดเพื่อนำไปวัดความหนาผิว ความเค้นและความเค้นตกค้างหลังการขึ้นรูป



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 (ก) ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการตัดเพื่อนำไปวัดความหนาผิว

นำชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปนำมาตัดแล้วทำความสะอาดให้เรียบร้อยเพื่อนำไปวัดความหนาผิว ความเค้นและความเค้นตกค้างหลังการขึ้นรูป

3.5 การวัดความหยาบผิว

ในการวัดความหยาบผิว ใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบพกพายี่ห้อ MITUTOYO รุ่น SJ-410 ทำการวัด 3 จุด บริเวณตำแหน่งเดียวกันของทุกชิ้นทดสอบ บน กลาง ล่างของชิ้นงาน โดยมีระยะในการวัดที่ 2.5 มิลลิเมตรโดยมีฟังก์ชันในการวัดเป็นแบบ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



(ก)



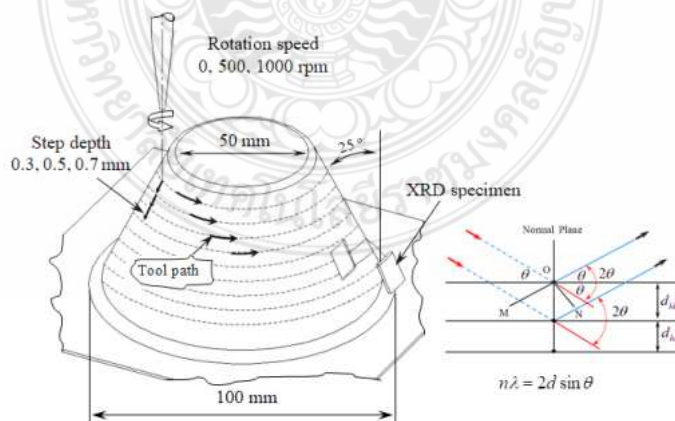
(ข)

รูปที่ 3.9 (ก) เครื่องวัดความหยาบผิว MITUTOYO รุ่น SJ-410

(ข) รูปตำแหน่งของการวัดความหยาบ

3.6 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่อง XRD

X-ray diffraction (XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบหรือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุ ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อรังสีเอกซ์ทำสัมผัสกับผลึก จะให้ข้อมูลโดยเป็นค่าการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในวัสดุ และสามารถบ่งบอกข้อบกพร่องหรือส่วนประกอบทางเคมีที่เจือปนในวัสดุในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุที่ทำการขึ้นรูป จะทำการตัดชิ้นงานก่อนและหลังการขึ้นรูปโดยให้มีขนาด 10x10 มิลลิเมตร เพื่อไปตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างผลึก บริเวณที่ตัดไปเพื่อทำการวิเคราะห์จะแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 บริเวณที่ทำการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาค

3.7 การวิเคราะห์ Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio)

เป็นกระบวนการทางสถิติที่ผู้วิจัยนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองความต้องการด้วยสัญญาณรบกวน S/N Ratio เพื่อประเมินผลกระทบของตัวแปรการทดลองที่ส่งผลต่อความเรียบผิวและความเค้นตกค้าง ของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยจะใช้หลักการ Smaller-the-Better (S/N Ratio) ซึ่งคำนวณค่าความแปรปรวนหรือความเบี่ยงเบนของค่าตัวแปร เพราะต้องการค่าตัวแปรตอบสนองที่น้อยลง โดยคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองส่วนเบี่ยงเบน (MSD) ของตัวแปรตอบสนอง โดยจะแสดงเป็นหน่วยเดซิเบล (dB) สำหรับสูตรสำหรับอัตราส่วน S/N คำนวณได้ตามสมการที่ (12)

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \times \log_{10} (\text{MSD}) \quad (12)$$

*หมายเหตุ

- เมื่อ S/N Ratio คือค่า Signal-to-Noise Ratio ในรูปแบบ Smaller-the-Better
- MSD คือค่า ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างในรูปแบบกำลังสองของตัวแปรตอบสนอง

เมื่อ MSD คือค่า Mean Squared Deviation ที่คำนวณจากผลของความเรียบผิววัสดุ และความเค้นตกค้างโดยให้ค่า MSD เป็นผลรวมของความแตกต่างระหว่างค่าตัวแปรตัวอย่างแต่ละค่ากับค่าตัวแปรที่ต้องการ จากนั้นนำไปยกกำลังสองและหารด้วยจำนวนตัวอย่างทั้งหมด เพื่อให้ได้ค่าความแปรปรวนเฉลี่ย ถ้าค่า MSD น้อยที่สุด จะบ่งบอกได้ว่าค่า S/N Ratio สูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำและคุณภาพที่ดีของผลลัพธ์ที่ต้องการ เมื่อคำนวณค่า MSD แล้วจะสามารถนำมาคำนวณ S/N Ratio ตามสมการด้านบนเพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองต่อค่าความเรียบผิว และความเค้นตกค้าง

3.8 นัยสำคัญของปัจจัยทางสถิติ (Analysis of Variance: ANOVA)

การประเมินผลกระทบต่อความเรียบผิววัสดุ และความเค้นตกค้าง ในเชิงสถิติของ Taguchi จะใช้ค่า Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio) และ Analysis of Variance (ANOVA) เพื่อประเมินความสำคัญของตัวแปรต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ได้ทำการขึ้นรูปลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบ 2 จุด จากนั้นคำนวณและวิเคราะห์ค่า ค่า S/N Ratio สำหรับแต่ละตัวแปรตามรูปแบบ Smaller-the-Better โดยคำนวณค่า S/N Ratio สำหรับแต่ละตัวแปร โดยใช้สมการที่แสดงในหัวข้อก่อนหน้าและวิเคราะห์ค่า S/N Ratio ด้วย ANOVA เพื่อจำแนกผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์ว่าตัวแปรไหนมีผลกระทบที่สำคัญต่อความเรียบผิว และความเค้นตกค้างในวัสดุ จากผลลัพธ์ของวิเคราะห์ ANOVA จะสามารถคำนวณค่านัยสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวได้ โดยใช้สัญญาณ P-value ของตัวแปรนั้น ๆ ในการวิเคราะห์นัยความสำคัญจะบ่งบอกถึงระดับของผลกระทบที่

สำคัญของตัวแปรต่อความเรียบผิววัสดุ และความเค้นตกค้าง โดยค่านัยความสำคัญที่มีค่าสูงกว่าจะแสดงถึงตัวแปรที่มีผลกระทบสำคัญมากขึ้นเพื่อในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป



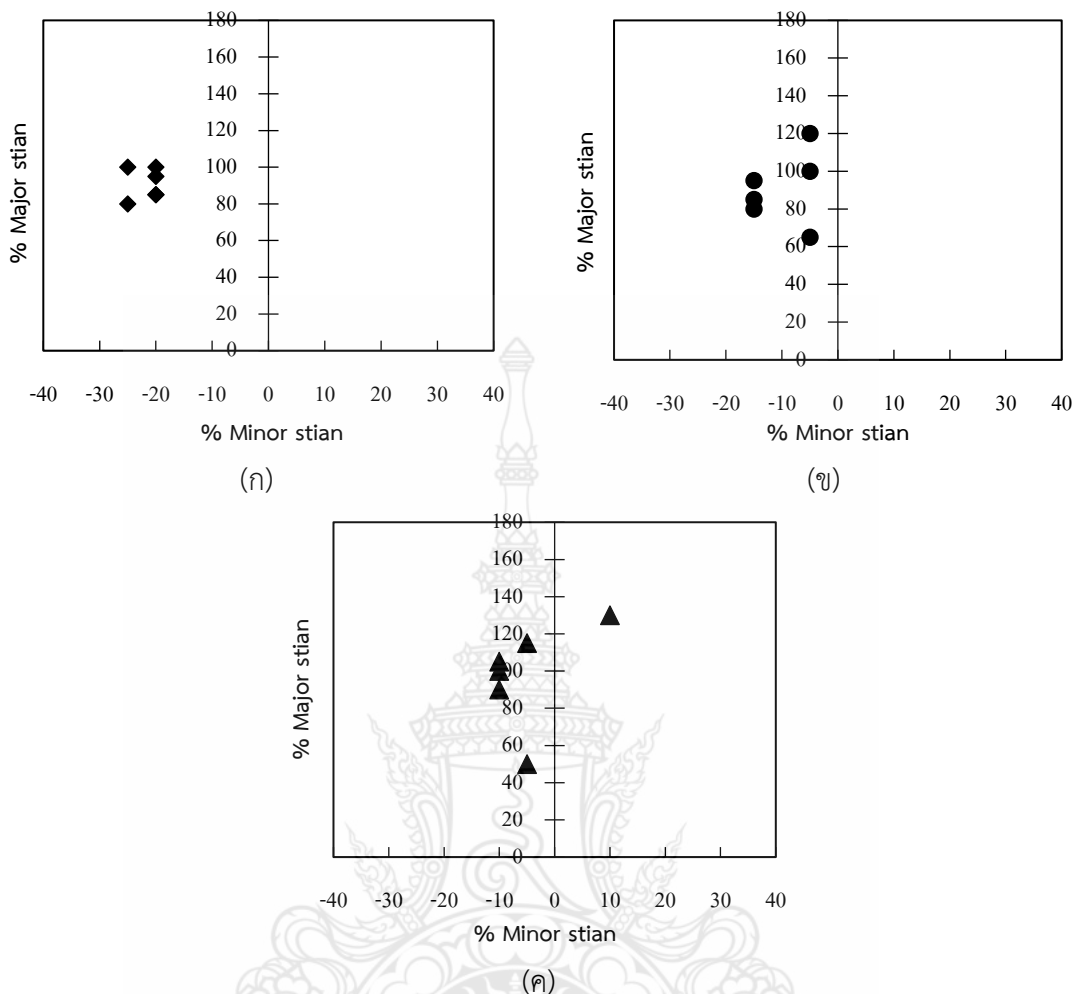
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้ทำการศึกษาระบวนการขึ้นรูปอลูมิเนียมผสม 5052 ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสแบบสองจุด ในการทดลองทำการเปรียบเทียบตัวแปรในการขึ้นรูป ได้แก่ ความเร็วรอบในการขึ้นรูปที่ 0-1000 rpm ความเร็วเดิน และระยะในการกดลึกลงที่ 0.3-0.7 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความเครียดบนผิวชิ้นงาน ความหยาบผิว ตลอดจนตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอลูมิเนียมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) โดยการวัดค่าจาก Peak ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหลังการขึ้นรูปทั้งหมด จากนั้นนำค่าจากผลจากการคำนวณมาสร้างสมการเส้นตรง เพื่อหาความเค้นตกค้าง ที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป ซึ่งผลการดำเนินการวิจัยมีผลการทดลองดังนี้

4.1 ความเครียดของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

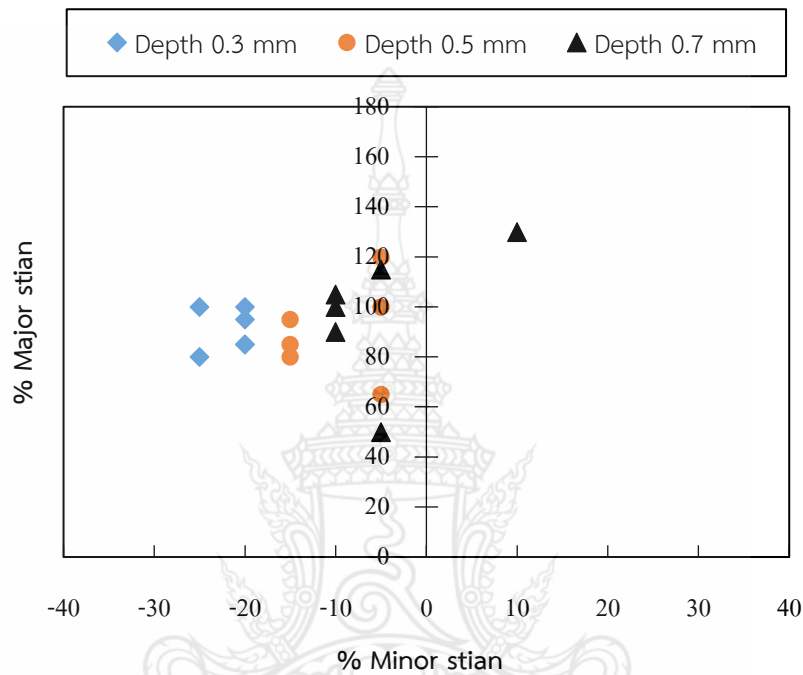
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก (% Major Strain) และความเครียดรอง (% Minor Strain) หลังการขึ้นรูปของชิ้นงานรูปถ้วยที่ผ่านการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด รูปที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm พบว่าเมื่อระยะในการกดลึกลงของเครื่องมือเพิ่มขึ้นส่งผลลักษณะพฤติกรรมความเครียดมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) ที่ความลึกในการกดขึ้นรูปที่ 0.3 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุโดยรวมเป็นพฤติกรรมแบบลักษณะการยืดในแนวบีบอัดตามแนวแกน (Uniaxial compression) รวมกับพฤติกรรมแบบเฉือน (Pure shear) และเมื่อเพิ่มระยะกดลึกลงเป็น 0.5 มิลลิเมตร พฤติกรรมของวัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดในแนวแกนหลักและไปในทิศทางของการยืดแนวแกนเดียว (Plan Strain) ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) จากนั้นเพิ่มระยะในการกดลึกลงในการขึ้นรูปเป็น 0.7 มิลลิเมตร กลับพบว่าพฤติกรรมของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเปลี่ยนเป็นรูปแบบการยืดในแนวแกนหลัก (Plan Strain) และค่อนข้างเป็นรูปแบบของการยืดออกสองแกน (Biaxial tension) เล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.1(ค)



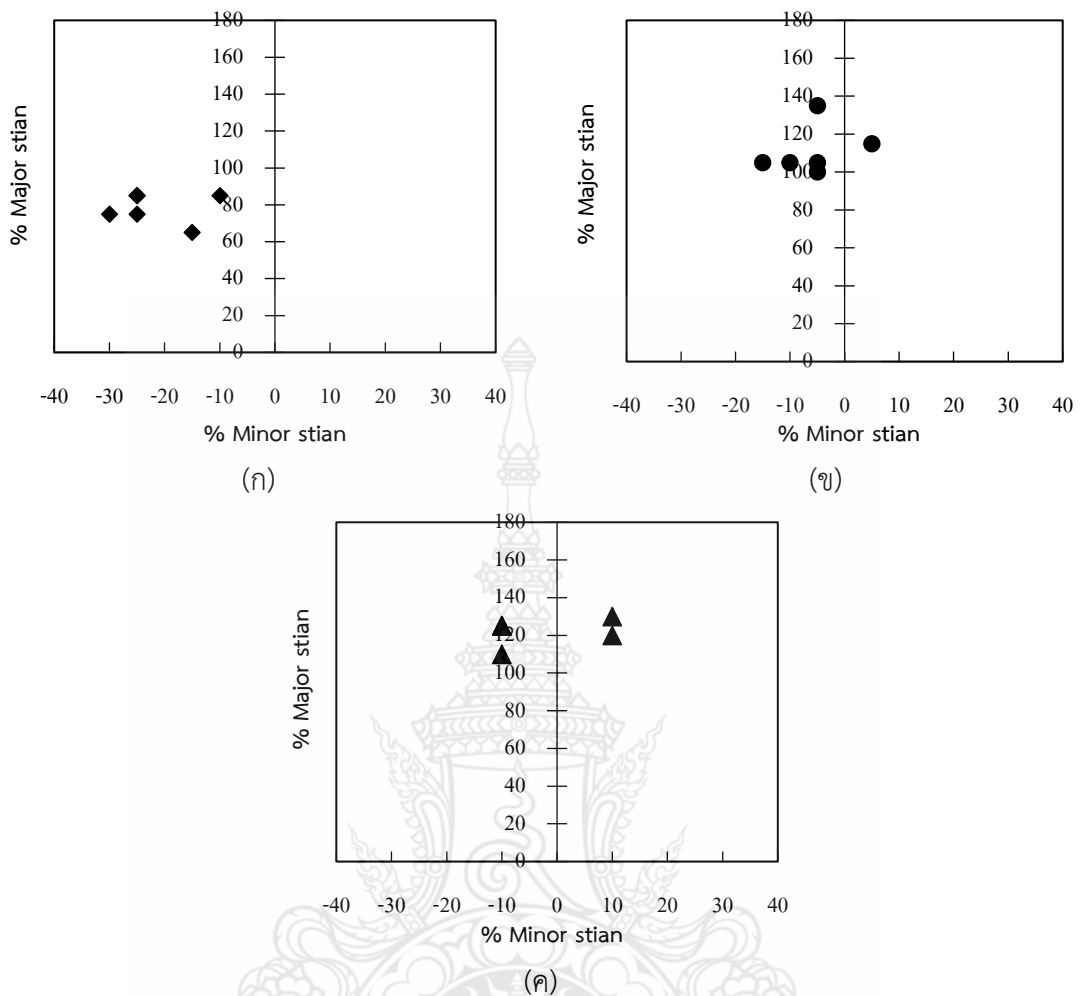
รูปที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm (ก) Depth 0.3 mm (ข) Depth 0.5 mm และ (ค) Depth 0.7 mm

จากผลของระยะกดลึกในรูปที่ 4.1 จากนั้นนำมาเปรียบเทียบผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าที่ระยะกดลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุแตกต่างกันดังได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา เนื่องจากระยะในการกดลึกอาจส่งผลต่อการไหลของเนื้อโลหะกล่าวคือ เมื่อที่ระยะความลึกในการกดขึ้นรูปต่ำทำให้การไหลในระนาบแกนรอง (ϵ_2) ได้ดีกว่าแกนหลัก (ϵ_1) เพราะเมื่อระยะกดขึ้นรูปต่ำการสัมผัสระหว่างเครื่องมือกดขึ้นรูปกับชิ้นงานในทิศทางแกน X,Y สูงกว่าการสัมผัสในแนวแกน Z ส่งผลให้เครื่องมือในการขึ้นรูปมีการเคลื่อนที่จึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลตัวไปด้านข้างมากกว่าส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมโดยรวมเป็นแบบการยืดในแนวบีบอัดตามแนวแกน (Uniaxial compression) แต่เมื่อเพิ่มระยะการกดลึกในการขึ้นรูปพบว่าแนวโน้มของพฤติกรรมของวัสดุ

เริ่มมีลักษณะเปลี่ยนแปลงจากการยืดในแนวบีบอัดตามแนวแกนเป็นการยืดแนวแกนเดียว (Plan Strain) และเมื่อความลึกในการกดเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มของพฤติกรรมของวัสดุก็เปลี่ยนเป็นการยืดในแนวแกนหลัก (Plan Strain) รวมกับรูปแบบของการยืดออกสองแกน (Biaxial tension) ด้วยเหตุผลในทางตรงกันข้ามกับระยะในการกดของเครื่องมือในการขึ้นรูปต่ำ



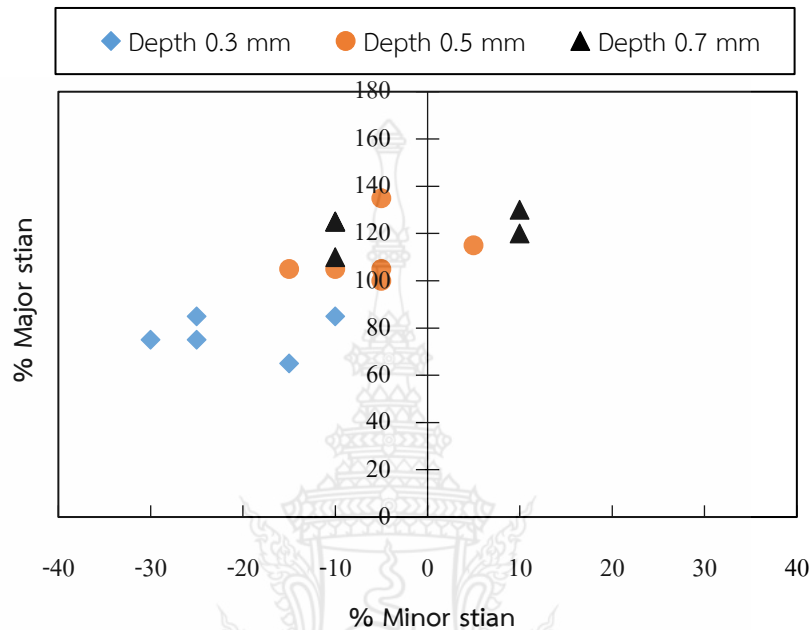
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm



รูปที่ 4.3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 500 rpm (ก) Depth 0.3 mm (ข) Depth 0.5 mm และ (ค) Depth 0.7 mm

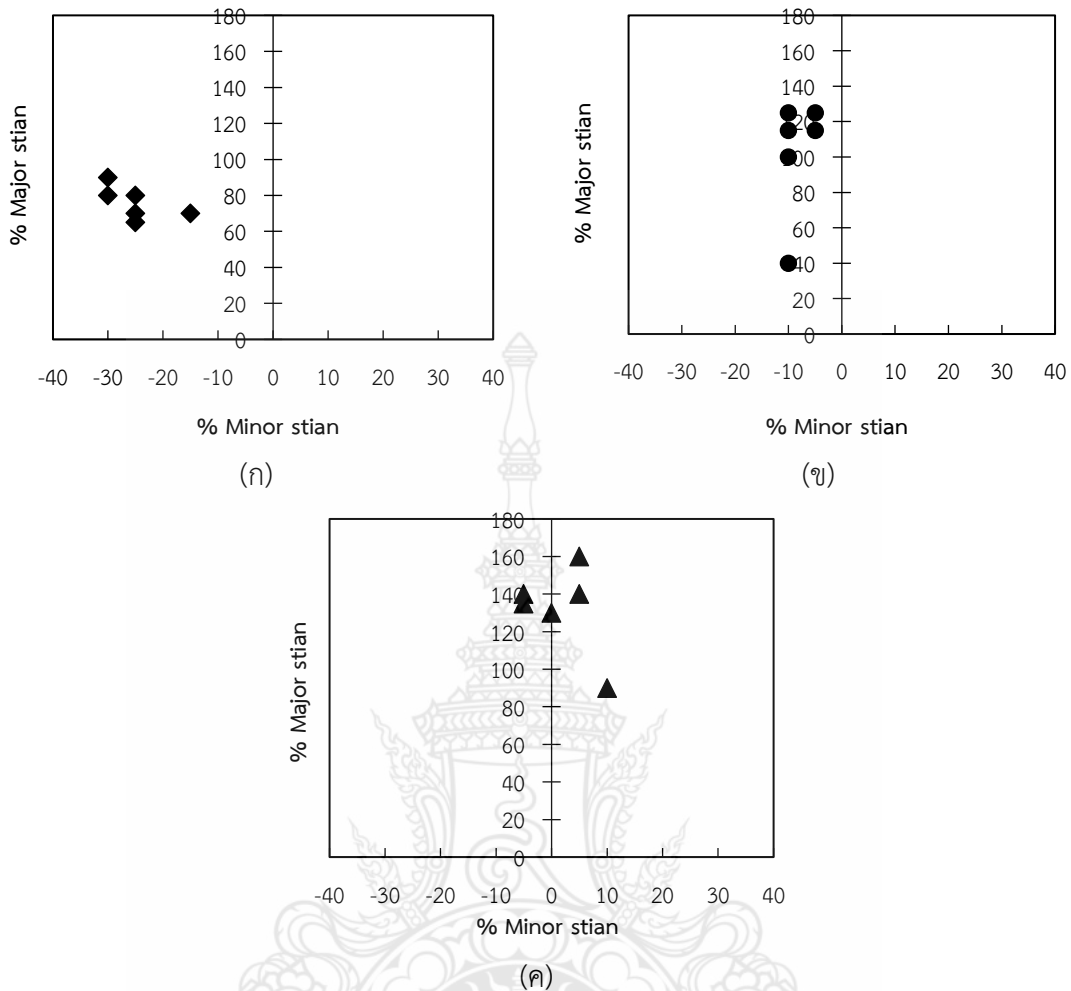
รูปที่ 4.3 ทำการเพิ่มความเร็วยรอบในการขึ้นรูปเป็น 500 rpm แต่ระยะในการกดขึ้นรูปยังคงมีค่าเท่ากับ 0.3-0.7 มิลลิเมตร พบว่าลักษณะพฤติกรรมของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปมีลักษณะคล้ายกับความเร็วยรอบในการขึ้นรูปที่ 0 rpm แต่พบว่าพฤติกรรมของชิ้นงานทั้งระดับทั้งสามความลึกส่วนใหญ่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมแบบการยืดออกสองแกน (Biaxial tension) เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการขึ้นรูปสูงขึ้น เช่น ที่ระดับความลึกในการขึ้นรูป 0.3 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุโดยรวมเป็นพฤติกรรมแบบลักษณะการยืดในแนวบีบอัดตามแนวแกน (Uniaxial compression) ร่วมกับพฤติกรรมแบบเฉือน (Pure shear) ดังรูปที่ 4.3(ก) และเมื่อเพิ่มระยะกดลึกเป็น 0.5 มิลลิเมตร พฤติกรรมของวัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดในแนวแกนหลักไปในทิศทางของการยืดแนวแกนเดียว (Plan

Strain) รวมกับการยืดในแนวบีบอัดตามแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข) จากนั้นเพิ่มระยะในการกดลึกในการขึ้นรูปเป็น 0.7 มิลลิเมตร กลับพบว่าพฤติกรรมของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเปลี่ยนเป็นรูปแบบการยืดในแนวแกนหลัก (Plan Strain) ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ค)



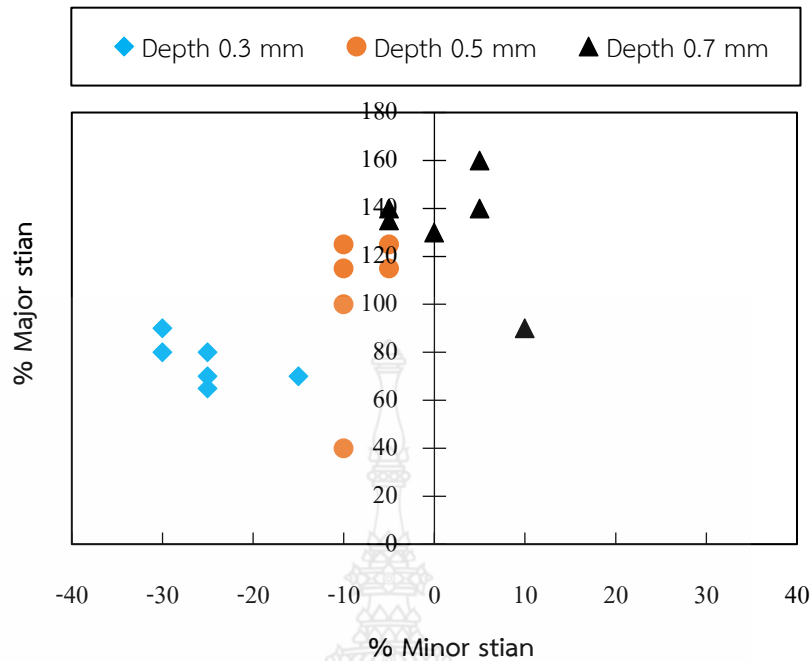
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 500 rpm

เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะในการกดขึ้นรูปทั้งสามความลึกพบว่าระยะกดลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่ระยะกดลึกในการขึ้นรูป 0.7 มิลลิเมตร ยังมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมแบบการยืดในแนวแกนเดียวแต่ไม่มีการเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการยืดสองแกนรวมด้วยเหมือนที่ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 0 rpm และเมื่อลดระยะในการกดลึกเหลือ 0.5 มิลลิเมตร และ 0.3 มิลลิเมตร พฤติกรรมความเครียดของชิ้นงานขึ้นรูปยังเป็นลักษณะการยืดแบบแกนเดียวและมีแนวโน้มเป็นการยืดในแนวบีบอัดตามแนวแกน สาเหตุอาจเกิดจากความเร็วยรอบที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลต่อการเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับผิววัสดุในการขึ้นรูปจึงส่งผลต่อการพาหรือการไหลตัวของเนื้อวัสดุลดลง



รูปที่ 4.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 1000 rpm (ก) Depth 0.3 mm (ข) Depth 0.5 mm และ (ค) Depth 0.7 mm

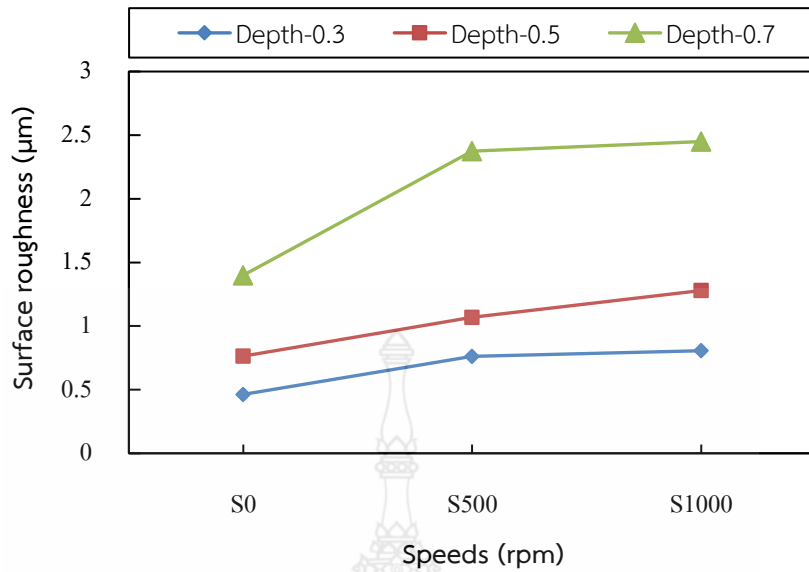
รูปที่ 4.6 ทำการเปรียบเทียบระยะในการกดขึ้นรูป 0.3-0.7 มิลลิเมตร ที่ความเร็วในการขึ้นรูป 1000 rpm พบว่าระยะในการกดขึ้นรูปส่งผลต่อพฤติกรรมความเครียดของชิ้นงานหลังการกดขึ้นรูป กล่าวคือที่ระยะในการกดขึ้นรูปต่ำลักษณะพฤติกรรมของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะแบบเฉือนอย่างเดี่ยวหรือเกิดการยืดในแนวแกนรองเป็นหลัก แต่เมื่อเพิ่มระยะในการกดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นพฤติกรรมของการเปลี่ยนเป็นลักษณะการยืดในแนวแกนหลักและมีแนวโน้มของการยืดออกทั้งสองแกน ดังรูปที่ 4.6 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อระยะในการกดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร การเปลี่ยนพฤติกรรมของความเครียดจะเป็นไปตามลักษณะที่กล่าวไว้



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 1000 rpm

4.2 ความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

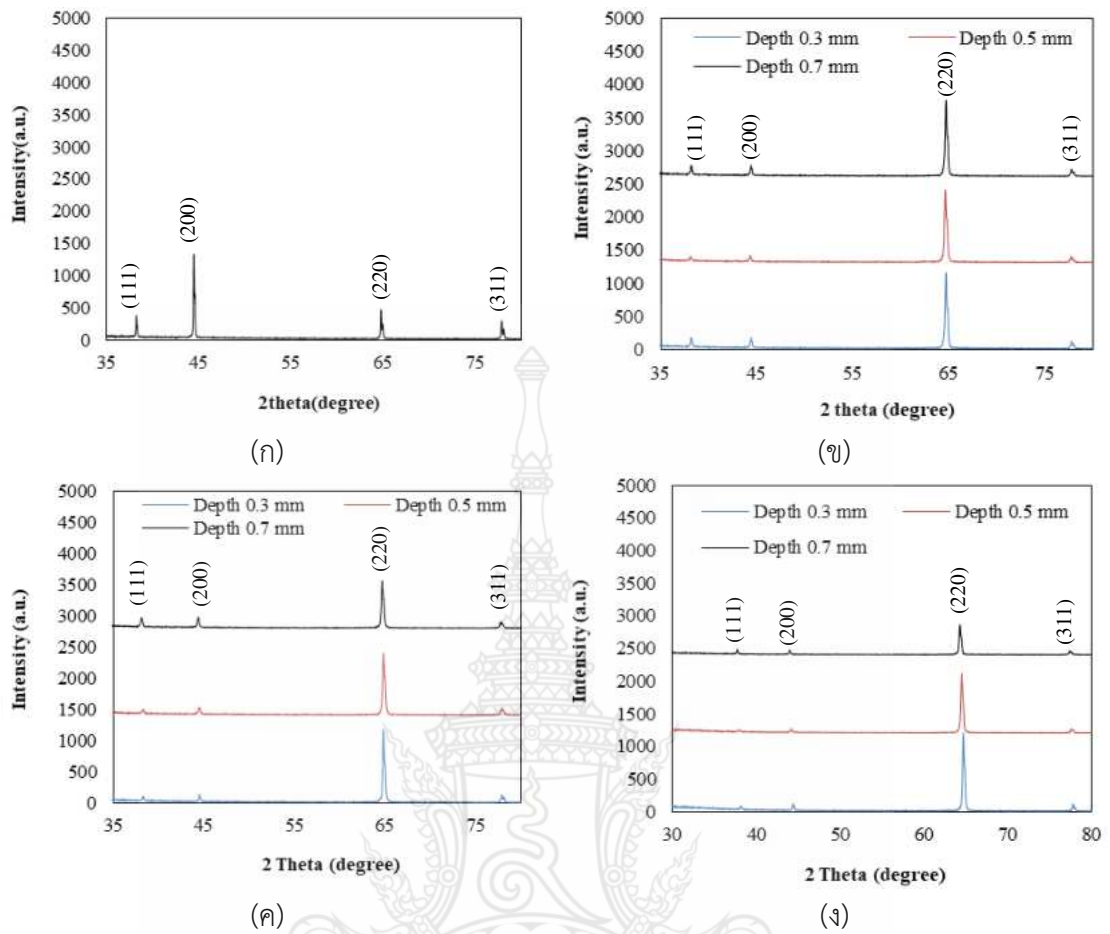
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความหยาบผิวและขนาดรูปร่างของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยการสัมผัสแบบสองจุด กระบวนการและวิธีการวัดแสดงในบทที่ 3 รูปที่ 3.9 แสดงค่าความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0-1000 rpm ระยะการกดลึก 0.3-0.7 มิลลิเมตร จากการตรวจสอบพบว่าปัจจัยในการขึ้นรูปส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน คือ ที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm ระยะในการกดขึ้นรูป 0.3 มิลลิเมตร ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำสุดเฉลี่ย 0.46 ไมโครเมตร และเมื่อเพิ่มระยะในการกดขึ้นรูปสูงขึ้นแนวโน้มของค่าความหยาบผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.76 และ 0.81 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มความเร็วรอบในการกดขึ้นรูปสูงขึ้นเป็น 500 rpm ลักษณะของความหยาบผิวคล้ายกับความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm แต่ค่าความหยาบผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.76, 1.07 และ 1.28 ไมโครเมตร ที่ระยะในการกดลึก 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร สุดท้ายคือความเร็วรอบ 1000 rpm พบว่าส่งผลต่อค่าความหยาบผิวสูงสุดของทุกระยะในการกดขึ้นรูป ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Dabwan A et al. [1] ซึ่งรายงานวาระยะในการกดขึ้นรูปส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 4.7 ความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0-1000 rpm ระยะการกดลึก 0.3-0.7 มิลลิเมตร

4.3 X-Ray Diffraction technical

การศึกษาความเค้นตกค้างระดับจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al5052 ในการทดลองการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องสัมผัสแบบสองจุดใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction โดยวัดค่าจาก Peak ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน โดยการคำนวณตามสมการที่ (6) จากนั้นนำผลการคำนวณแล้วมาสร้างสมการเส้นตรงเพื่อหาค่าความชัน (Slope) สำหรับการประเมินความเครียด และความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป รูปที่ 16(ก) แสดง XRD patterns ของชิ้นงานอลูมิเนียมผสม Al5052 ที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูป จากนั้นทำการวัด Peak เพื่อหาค่า FWHM ตามทฤษฎีการวิเคราะห์ของ Williamson and Hall method ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.1 จากนั้นทำการสร้างกราฟเพื่อหาความชันแสดงดังภาพที่ 16(ข-ง) แล้วนำค่า m มาคำนวณหาความเค้นตกค้าง ตามสมการที่ (7) พบว่าความเค้นตกค้างของอลูมิเนียมผสม Al5052 ที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปแสดงมีค่าเท่ากับ 15.857 MPa และการวัดค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานก็ทำการประเมินในลักษณะเดียวกันกับชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูป

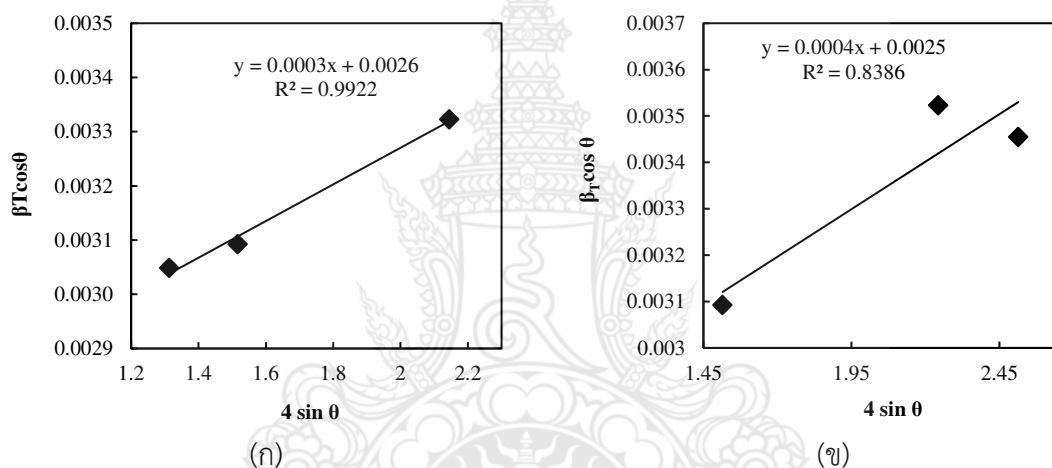


รูปที่ 4.8 shows the XRD analysis (ก) XRD patterns of Al5052 before forming. (ข) 0 rpm, (ค) 500 rpm, and (ง) 1000 rpm of Spindle speed

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดจุลภาคของอลูมิเนียมที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูป

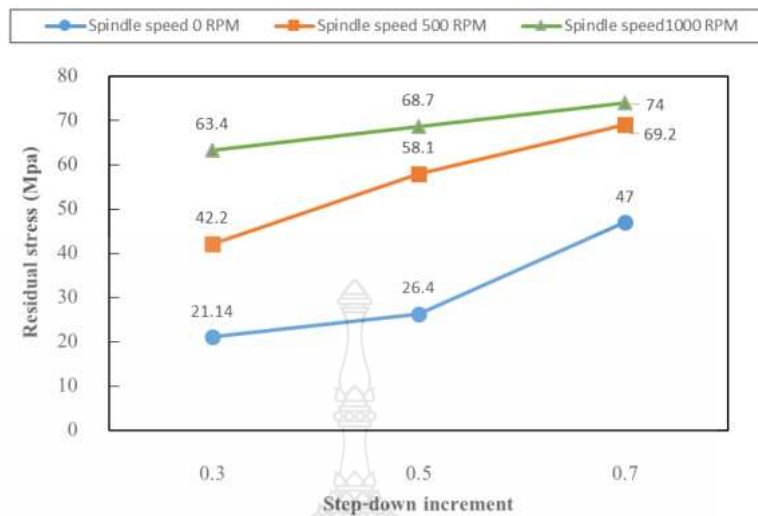
(h k l)	2θ (degree)	θ (radians)	FWHM (β_T) in degree	FWHM (radians) ($\times 10^{-3}$)	$\beta_T \cos \theta$ ($\times 10^{-3}$)	$4 \sin \theta$
111	38.29	0.33	0.18	3.22	3.05	1.31
200	44.53	0.39	0.19	3.34	3.09	1.52
220	64.84	0.57	0.22	3.94	3.32	2.14
311	77.89	0.68	0.13	2.26	1.75	2.51

XRD patterns of Al5052 หลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0-1000 rpm และ Increment step 0.3-0.7 mm. วิธีการศึกษาได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา จากการเปรียบเทียบจะอธิบายเทียบกับอลูมิเนียมที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 4.8(ก) XRD patterns พบว่าความเข้มชั้นของระนาบผลึก (200) สูง แต่เมื่อทำการขึ้นรูปกลับพบว่าความเป็นระนาบผลึกของอลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนแปลงจากระนาบ (200) เป็นระนาบผลึก (220) ภาพที่ 4.8(ข-ง) มีลักษณะคล้ายกัน คือ หลังการขึ้นรูปความเป็นระนาบผลึกของอลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนแปลงจากระนาบ (200) เป็นระนาบผลึก (220) แต่ความเข้มของ peak มีค่าแตกต่างกัน จากนั้นทำการวัด Peak เพื่อหาค่า FWHM สำหรับประเมินหาความเครียดของชิ้นงานก่อนสร้างกราฟเพื่อหาความชันแล้วทำการคำนวณหาความเค้นตกค้างดังแสดงในรูปที่ 4.9(ก-ข) แสดงตัวอย่างกราฟความชันของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป



รูปที่ 4.9 Shows the Plot of $\beta_T \cos \theta$ versus $4 \sin \theta$ (ก) Al5052 before forming (ข) 0 rpm and 0.3 mm of Increment step

การขึ้นรูปแบบต่อเนื่องเป็นวิธีที่ทำให้โลหะเสียรูปแบบถาวรโดยมีหวัคดลงบนชิ้นงานและเกิดความเค้นตกค้างแบบแรงดึงและจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นแบบแรงอัด Isaac Jiménez[30] ในการวิจัยนี้เป็นการวิจัยตัวแปรที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้างผลพบว่าที่ความเร็วรอบของหวัคดที่ 0 รอบต่อนาทีกับความลึกในการขึ้นรูปที่ 0.3 มม. ให้ค่าความเค้นตกค้างน้อยที่สุดคือ 21.14 Mpa เมื่อเพิ่มความลึกในการขึ้นรูปจะส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้นตามและเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ 500 และ 1,000 RPM กับความลึกในการขึ้นรูปที่ 0.5 และ 0.7 มม. จะส่งผลให้ความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้นตามลำดับแสดงในรูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้างกับระยะลึกและความเร็วในการหมุนของหวัคดในการขึ้นรูปซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fabian Maaß [14]



รูปที่ 4.10 Shows the Plot of Residual stress versus Step-down increment

4.4 การวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูป

การวิเคราะห์ปัจจัย TPIF process ใช้เทคนิคทากูชิซึ่งเป็นเทคนิคสำหรับการออกแบบและทำการทดลองจนเป็นกระบวนการค้นหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่ได้จากปัจจัยในการนำมาทำการทดลองเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิธีทากูชิ คือ ออโรคอนอลอะเรย์เป็นระบบเมตริกซ์ของจำนวนข้อกำหนดในระดับแถวและคอลัมน์ วิธีการทากูชิคือการใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวน จะหาจำนวนของตัวแปรที่มีอยู่ อัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวน คือค่าเฉลี่ยที่ใช้วัดของผลกระทบของปัจจัยรบกวน (noise) ตามลักษณะของสมรรถนะของตัวแปร และจะทำการวัดค่าทั้งสอง คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวนของจำนวนตัวแปรในข้อมูลของผลตอบและเพื่อให้เข้าใจค่าเฉลี่ยของผลตอบของเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด ซึ่งอัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวนเป็นการเข้ารวมกันระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการวัดค่าของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวนสำหรับการศึกษานี้เลือกเป้าหมายของการทดลองสำหรับสมการแบบเป้าหมายค่าน้อยสุด (The smaller-is-better) ดังแสดงในสมการที่ (13) เนื่องจากผลลัพธ์คือค่าความหยาบผิว และความเค้นตกค้างบนชิ้นงาน หลังการขึ้นรูปใช้ออโรคอนอลอะเรย์ L-9 (3²) ดังนั้นจึงทำการทดลองเท่ากับ 9 การทดลองซึ่งการจัดลำดับแบบออโรคอนอลอะเรย์ที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

$$S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (13)$$

ตารางที่ 4.2 Factors and parameters of the experiment

Experimental factors	Experimental level		
	-1	0	1
Rotation speeds : (rpm)	0	500	1000
Incremental depth : (mm)	0.3	0.5	0.7

4.4.1 Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio)

Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio) ถูกนำมาวิเคราะห์ระดับปัจจัยของกระบวนการ โดยที่อัตราส่วน S/N ต่ำสุดแสดงถึงคุณภาพชิ้นงานหลังการขึ้นรูป (ยิ่งน้อยยิ่งดี) ดังนั้นปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการ TPIF จึงต้องการตัวแปรที่มีค่า S/N ต่ำสุด เนื่องจาก residual stress และ Surface roughness ที่มากเกินไปไม่ส่งผลดีต่อชิ้นงานหลังการขึ้นรูป สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราส่วน S/N แสดงดังสมการที่ (13)

(1) S/N Ratio for residual stress

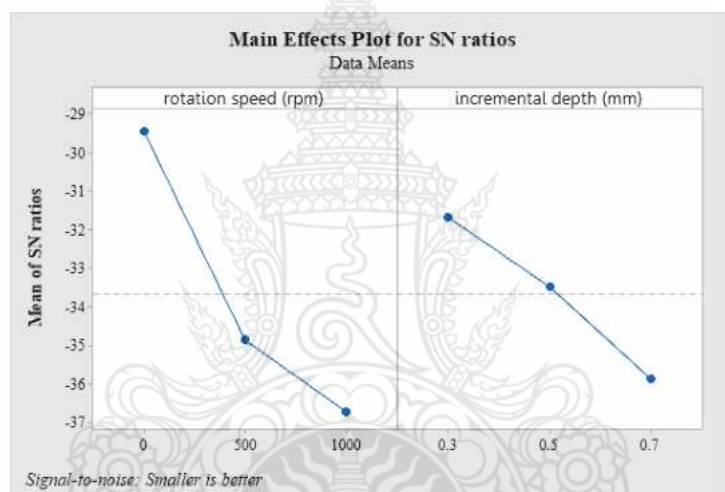
สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาพารามิเตอร์ในกระบวนการ TPIF ต่อ residual stress ในชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยรูปแบบการทดลอง ผลการทดลอง และค่าอัตราส่วน S/N ของ residual stress แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าการทดลองที่ให้ residual stress น้อยสุด คือ การทดลองที่ 1 (A₁B₁) คือ Rotation speed ในการขึ้นรูปที่ 0 rpm และ Incremental depth ที่ 0.3 มิลลิเมตร ให้ Residual stress น้อยสุด คือ 21.14 MPa ส่วน Residual stress สูงสุดของการทดลองอยู่ที่การทดลองที่ 9 (A₃B₃) ให้ค่า Residual stress เท่ากับ 74.00 MPa ที่ Rotation speed ในการขึ้นรูปที่ 1000 rpm และ Incremental depth ที่ 0.7 มิลลิเมตร ส่วนลำดับการทดลองอื่นของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 Experimental layout: L9 orthogonal array, mean residual stress values, and S/N ratio values.

Run	Rotation speed (rpm): A	Incremental depth (mm): B	Residual stress (MPa)	SN-Ratio
1	0	0.3	21.14	-26.5021
2	0	0.5	26.40	-28.4321
3	0	0.7	47.00	-33.4420
4	500	0.3	42.20	-32.5062
5	500	0.5	58.10	-35.2835
6	500	0.7	69.20	-37.9745

7	1000	0.3	63.40	-36.0418
8	1000	0.5	68.70	-36.7391
9	1000	0.7	74.00	-37.3846

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลกระทบหลักของปัจจัยต่อค่าอัตราส่วน S/N ของ residual stress ผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่าอัตราส่วน S/N ต่ำสุดของ Rotation speed อยู่ที่ระดับที่ 1 คือ 0 rpm และค่าอัตราส่วน S/N ต่ำสุดของ Incremental depth อยู่ที่ระดับที่ 1 คือ 0.3 mm ในทางตรงกันข้ามค่าอัตราส่วน S/N สูงสุดของ Rotation speed อยู่ที่ระดับที่ 3 คือ 1000 rpm และ ค่าอัตราส่วน S/N สูงสุดของ Incremental depth อยู่ที่ระดับที่ 3 คือ 0.7 mm



รูปที่ 4.11 Main effects plot for the S/N ratio for residual stress

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าตอบสนองค่าอัตราส่วน S/N ต่อค่า residual stress ของปัจจัยในแต่ละระดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าตอบสนองค่าอัตราส่วน S/N ของ Rotation speed มีค่าต่ำสุดที่ระดับที่ 1 คือ -29.46 และค่าตอบสนองค่าอัตราส่วน S/N ของ Incremental depth ระดับที่ 1 มีค่าต่ำสุดคือ -31.68

ตารางที่ 4.4 Response table for S/N ratios of residual stress

Level	Rotation speeds (rpm)	Incremental depth (mm)
1	-29.46	-31.68
2	-34.86	-33.48
3	-36.72	-35.88
Delta	7.26	4.19
Rank	1	2

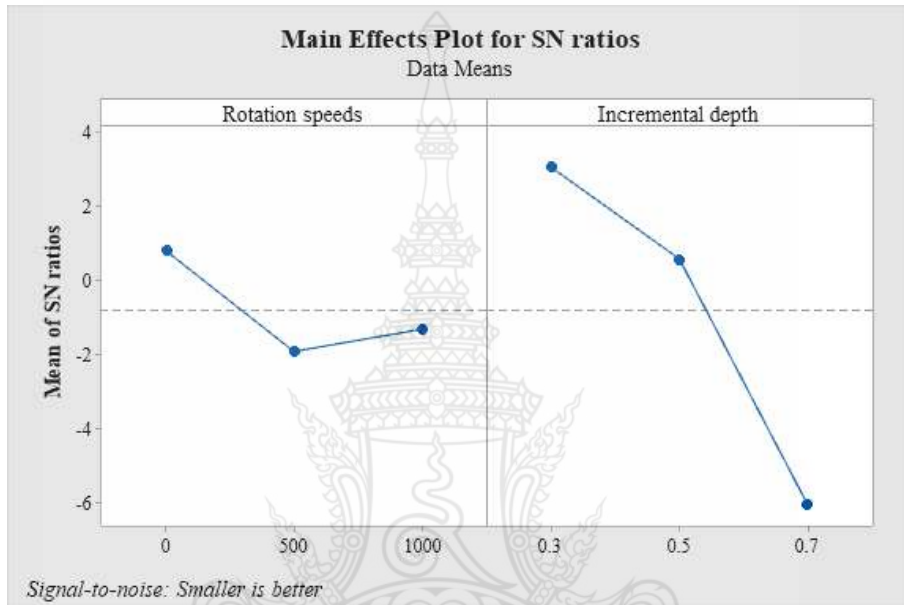
(2) S/N Ratio for Surface roughness

รูปแบบการทดลอง ผลการทดลอง และค่าอัตราส่วน S/N ของ Surface roughness แสดงดังตารางที่ 7 ส่วนผลตอบสนองค่าเฉลี่ย S/N ของ Surface roughness แสดงดังตารางที่ 6 ตามลำดับ พบว่าการทดลองที่ให้ Surface roughness ต่ำสุด คือ การทดลองที่ 1(A₁B₁) คือ Rotation speed ในการขึ้นรูปที่ 0 rpm และ Incremental depth ที่ 0.3 มิลลิเมตร ให้ Surface roughness น้อยสุด คือ 0.46 μm ส่วน Surface roughness สูงสุดของการทดลองอยู่ที่การทดลองที่ 6 (A₂B₃) ให้ค่า Residual stress เท่ากับ 2.45 μm ที่ Rotation speed ในการขึ้นรูปที่ 500 rpm และ Incremental depth ที่ 0.7 มิลลิเมตร ส่วนลำดับการทดลองอื่นของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 Experimental layouts: L9 orthogonal array, mean surface roughness values, and S/N ratio values

Run	Rotation speed (rpm): A	Incremental depth (mm): B	Surface roughness (μm)	SN-Ratio
1	0	0.3	0.46	6.69
2	0	0.5	1.16	-1.32
3	0	0.7	1.40	-2.92
4	500	0.3	0.98	0.18
5	500	0.5	0.81	1.87
6	500	0.7	2.45	-7.78
7	1000	0.3	0.76	2.37
8	1000	0.5	0.87	1.22
9	1000	0.7	2.37	-7.51

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลกระทบหลักของปัจจัยต่อค่าอัตราส่วน S/N ของ Surface roughness ผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่าอัตราส่วน S/N ต่ำสุดของ Rotation speed อยู่ที่ระดับที่ 1 คือ 0 rpm และ ค่าอัตราส่วน S/N ต่ำสุดของ Incremental depth อยู่ที่ระดับที่ 1 คือ 0.3 mm ในทางตรงกันข้ามค่าอัตราส่วน S/N สูงสุดของ Rotation speed อยู่ที่ระดับที่ 2 คือ 500 rpm และ ค่าอัตราส่วน S/N สูงสุดของ Incremental depth อยู่ที่ระดับที่ 3 คือ 0.7 mm



รูปที่ 4.12 Main effects plot for the S/N ratio for Surface roughness

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตอบสนองค่าอัตราส่วน S/N ต่อค่า Surface roughness ของปัจจัยในแต่ละระดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าตอบสนองค่าอัตราส่วน S/N ของ Rotation speed มีค่าต่ำสุดที่ระดับที่ 2 คือ -1.9082 และค่าตอบสนองค่าอัตราส่วน S/N ของ Incremental depth ระดับที่ 3 มีค่าต่ำสุด คือ -6.0701

ตารางที่ 4.6 Response table for S/N ratios of Surface roughness

Level	Rotation speeds (rpm)	Incremental depth (mm)
1	0.8178	3.0804
2	-1.9082	0.5932
3	-1.3061	-6.0701
Delta	2.7260	9.1505
Rank	2	1

(3) Analysis of Variance (ANOVA)

การค้นหปัจจัยที่มีนัยยะสำคัญทางสถิติ โดยใช้ ANOVA เกี่ยวกับปัจจัยของกระบวนการที่ส่งผลต่อการตอบสนองและระดับความสำคัญของปัจจัยที่พิจารณา ตาราง ANOVA สำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวน ของค่าเฉลี่ย Residual stress และ Surface roughness ของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ค่าที่ได้จากการคำนวณ ระบุในตารางที่ 4.7-4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า Rotation speed ส่งผลต่อ Residual stress ส่วน Incremental depth ไม่ส่งผลต่อ Residual stress แต่สำหรับ Surface roughness พบว่า Incremental depth ส่งผลต่อ Surface roughness ส่วน Rotation speed ไม่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของ Surface roughness ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 4.7 Analysis of variance for the S/N ratios for residual stress

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
rotation speed (rpm)	2	85.422	85.422	42.711	17.96	0.010
incremental depth (mm)	2	26.544	26.544	13.272	5.58	0.070
Residual Error	4	9.511	9.511	2.378		
Total	8	121.477				

S = 0.5420; R-Sq = 92.17 %; R-Sq (adj) = 84.34 %

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าอัตราส่วน S/N ค่าเฉลี่ย Residual stress พบว่า R-Sq = 92.17 % แสดงให้เห็นว่าปัจจัยมีความสัมพันธ์กัน ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Residual stress คือ Rotation speed มีค่า P-Value < 0.05 อยู่ในเขตวิกฤตแสดงว่าปัจจัยส่งผลต่อ residual stress ส่วน Incremental depth มีค่า P-Value > 0.05 ไม่อยู่ในเขตวิกฤต แสดงว่าปัจจัยนี้ไม่ส่งผลต่อ residual stress ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าอัตราส่วน S/N ค่าเฉลี่ย Surface roughness พบว่า R-Sq = 82.91 % แสดงให้เห็นว่าปัจจัยมีความสัมพันธ์กัน ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Surface roughness คือ Incremental depth มีค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าปัจจัยนี้ส่งผลต่อ Surface roughness อย่างมีนัยสำคัญ. ส่วน Rotation speeds มีค่า P-Value > 0.05 แสดงว่าพารามิเตอร์นี้ไม่ส่งผลต่อ Surface roughness อย่างมีนัยสำคัญ. ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.8 Analysis of variance for the S/N for Surface roughness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation speeds (rpm)	2	12.30	12.30	6.152	0.81	0.505
Incremental depth (mm)	2	134.32	134.32	67.158	8.89	0.034
Residual Error	4	30.23	30.23	7.557		
Total	8	176.85				

S = 2.7489; R-Sq = 82.91 %; R-Sq (adj) = 65.82 %

(4) Regression Analysis

จากผลการทดลองได้ค่าปัจจัยในการขึ้นรูปที่ดีที่สุดต่อ Residual stress ต่ำสุด คือ Rotation speed 0 rpm and Incremental depth 0.3 mm จากการคาดการณ์ Residual stress ต่ำสุดด้วยวิธีการทากูชิ มี Residual stress เท่ากับ 21.55 MPa ส่วนผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อคาดการณ์ Residual stress แสดงดังสมการ (14)

$$\text{Residual stress (MPa)} = 7.20 + 0.03719(\text{Rotation speed}) + 52.9 (\text{Incremental depth}) \quad (14)$$

แทนค่าเพื่อคาดการณ์ Residual stress ในสมการถดถอย จะได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Residual stress (MPa)} &= 7.20 + 0.03719(0) + 52.9 (0.3) \\ &= 23.07 \text{ MPa} \end{aligned}$$

พารามิเตอร์ระดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ Surface roughness ต่ำสุด คือ Rotation speed 0 rpm และ Incremental depth 0.3 mm จากการคาดการณ์ Surface roughness ต่ำสุดด้วยวิธีการทากูชิ มี Surface roughness เท่ากับ 0.491 μm ส่วนผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อคาดการณ์ Surface roughness แสดงดังสมการ (15)

$$\text{Ra } (\mu\text{m}) = -0.586 + 0.000326 (\text{Rotation speed}) + 3.350 (\text{Incremental depth}) \quad (15)$$

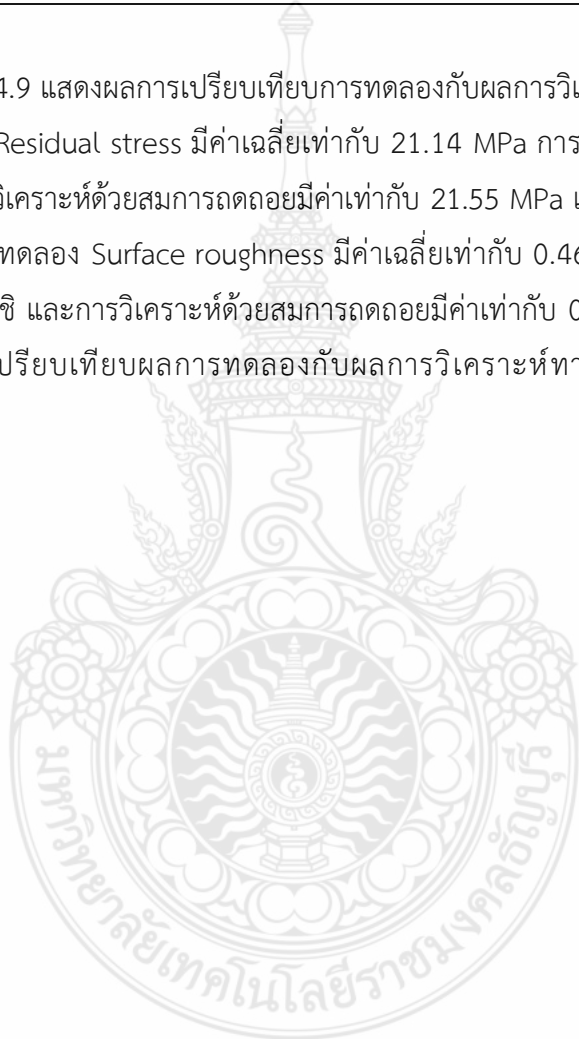
แทนค่าเพื่อคาดการณ์ Surface roughness ในสมการถดถอย จะได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Ra } (\mu\text{m}) &= -0.586 + 0.000326 (0) + 3.350 (0.3) \\ &= 0.419 \mu\text{m} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติของผลตอบ

Response	statistical analysis		Experimental
	Taguchi model	Regression analysis	
Residual stress (MPa)	21.55	23.07	21.14
Surface roughness (μm)	0.491	0.419	0.460

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า การยืนยันผลการทดลอง Residual stress มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.14 MPa การทำนายค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีทาคุชิ และการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยมีค่าเท่ากับ 21.55 MPa และ 23.07 MPa ตามลำดับ ส่วนการยืนยันผลการทดลอง Surface roughness มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 μm การทำนายค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีทาคุชิ และการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยมีค่าเท่ากับ 0.491 μm และ 0.419 μm ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติของผลตอบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปอลูมิเนียมผสม Al5052 ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสแบบสองจุด ในการทดลองทำการเปรียบเทียบตัวแปรในการขึ้นรูป ได้แก่ ความเร็วรอบในการขึ้นรูปที่ 0-1000 rpm ความเร็วเดิน และระยะในการกดลึกลงที่ 0.3-0.7 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความเครียดบนผิวชิ้นงาน ความเรียบผิว ตลอดจนตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอลูมิเนียมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) จากนั้นนำค่าจากผลจากการคำนวณมาสร้างสมการเส้นตรงเพื่อหาความเค้นตกค้าง หลังการขึ้นรูป ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การศึกษาระยะในการกดขึ้นรูปพบว่าที่ระยะความลึกในการกดลึกลงที่ 0.3 มิลลิเมตร พฤติกรรมความเครียดของชิ้นงานลักษณะการยืดในแนวบีบอัดตามแนวแกน (Uniaxial compression) รวมกับพฤติกรรมแบบเฉือน (Pure shear) และเมื่อเพิ่มระยะกดลึกลงเป็น 0.5 มิลลิเมตร พฤติกรรมของวัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดในแนวแกนหลักและไปในทิศทางของการยืดแนวแกนเดียว (Plan stain) ตลอดจนมีรูปแบบการยืดในแนวแกนหลัก (Plan stain) และค่อนข้างเป็นรูปแบบของการยืดออกสองแกน (Biaxial tension) เมื่อระยะในการกดขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

2. ความเร็วรอบในการขึ้นรูปพบว่าที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm พฤติกรรมของวัสดุโดยรวมอยู่ในสภาวะยืดตรงตามแนวแกนหลัก แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 500 rpm พฤติกรรมของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงความเครียดตามแกนหลักเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มเกิดการยืดสองแกนผสมกับสภาวะยืดตรงตามแนวแกนหลัก จากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการขึ้นรูปสูงขึ้นเป็น 1000 rpm ค่าความเครียดของชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมโดยรวมเป็นแบบการยืดตรงในแนวแกนหลักและมีแนวโน้มเป็นแบบการยืดแบบสองแกนเมื่อความเร็วรอบในการกดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น

3. ค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปพบว่าความเร็วรอบและระยะในการกดขึ้นรูปส่งผลต่อค่าความเค้นตกค้าง คือ เมื่อความเร็วรอบและระยะในการกดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มของค่าความเค้นตกค้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

4. ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0-1000 rpm ระยะการกดลึกลง 0.3-0.7 มิลลิเมตร พบว่าที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป และระยะในการกดขึ้นรูปต่ำ ค่าความ

เรียบผิวของชิ้นงานดีขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบและระยะในการกดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มของผิวชิ้นงานมีความเรียบผิวสูงขึ้น

5. ปัจจัยการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่เหมาะสม คือ การทดลองที่ 1 ความเร็วยรอบในการขึ้นรูปที่ 0 rpm และระยะในการกดขึ้นรูปที่ 0.3 มิลลิเมตร ให้ค่าความเค้นตกค้างและค่าความเรียบผิวน้อยสุดที่ 21.54 MPa และ 0.46 μm การวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลักของแต่ละปัจจัย พบว่า ความเร็วยรอบในการขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวนเฉลี่ยของค่าความเค้นตกค้างรองลงมาเป็นความลึกในการกด แต่ในทางตรงกันข้ามความลึกในการขึ้นรูปส่งผลต่อค่าความเรียบผิวมากกว่าความเร็วยรอบในการขึ้นรูป

6. ผลการเปรียบเทียบการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า การยืนยันผลการทดลอง Residual stress มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.14 MPa การทำนายค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีทากูชิ และการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยมีค่าเท่ากับ 21.55 MPa และ 23.07 MPa ตามลำดับ ส่วนการยืนยันผลการทดลอง Surface roughness มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 μm การทำนายค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีทากูชิ และการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยมีค่าเท่ากับ 0.491 μm และ 0.419 μm ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติของผลตอบ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวและความเค้นตกค้างของอลูมิเนียมผสม AA5052 ด้วย Two points incremental forming (TPIF) process มีข้อเสนอแนะของงานวิจัยดังนี้

1. ในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไปควรมีการตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดผลึกการเพิ่มขึ้นของปริมาณดิสโลเคชันของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอื่น ๆ
2. ในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไปควรมีการตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยด้วยเทคนิคการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (FEM) เพื่อยืนยันผลการทดลอง
3. ในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไปควรมีการตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยที่หลากหลาย เช่น ความเร็วเดิน สารหล่อลื่น ฯลฯ เนื่องจากอาจส่งผลต่อชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

บรรณานุกรม

- [1] Dabwan, A., Ragab, A. E., Saleh, M. A., Anwar, S., Ghaleb, A. M., & Rehman, A. U. (2020). **Study of the effect of process parameters on surface profile accuracy in single-point incremental sheet forming of AA1050-H14 aluminum alloy.** *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
- [2] Uttarwar, P. B., Raini, S. K., & Malwad, D. S. (2015). **Optimization of process parameter on Surface Roughness (Ra) and Wall Thickness on SPIF using Taguchi method.** *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(9), 781-784.
- [3] Lopes, T. F. R. D. S. (2013). **Estampagem incremental: compensação do retorno elástico e análise à rotura.**
- [4] Silva, M. B., & Martins, P. A. F. (2013). **Two-point incremental forming with partial die: theory and experimentation.** *Journal of materials engineering and performance*, 22(4), 1018-1027.
- [5] Maqbool, F.; Bambach, M. **Experimental and numerical investigation of the influence of process parameters in incremental sheet metal forming on residual stresses.** *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, 31.
- [6] Huber, N.; Heerens, J. **On the effect of a general residual stress state on indentation and hardness testing.** *Acta Mater.* 2008, 56, 6205–6213.
- [7] Bambach, M.; Araghi, B.T.; Hirt, G. **Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming.** *Prod. Eng.* 2009, 3, 145–156.
- [8] Subrahmanyam, A., Lingam, R., Hayakawa, K., Tanaka, S., & Reddy, N. V. (2020). **Experimental and numerical investigation of residual stresses in incremental forming.** *Materials transactions*, 61(2), 228-233.
- [9] Baak, N., Garlich, M., Schmiedt, A., Bambach, M., & Walther, F. (2017). **Characterization of residual stresses in austenitic disc springs induced by martensite formation during incremental forming using micromagnetic methods.** *Materials Testing*, 59(4), 309-314.

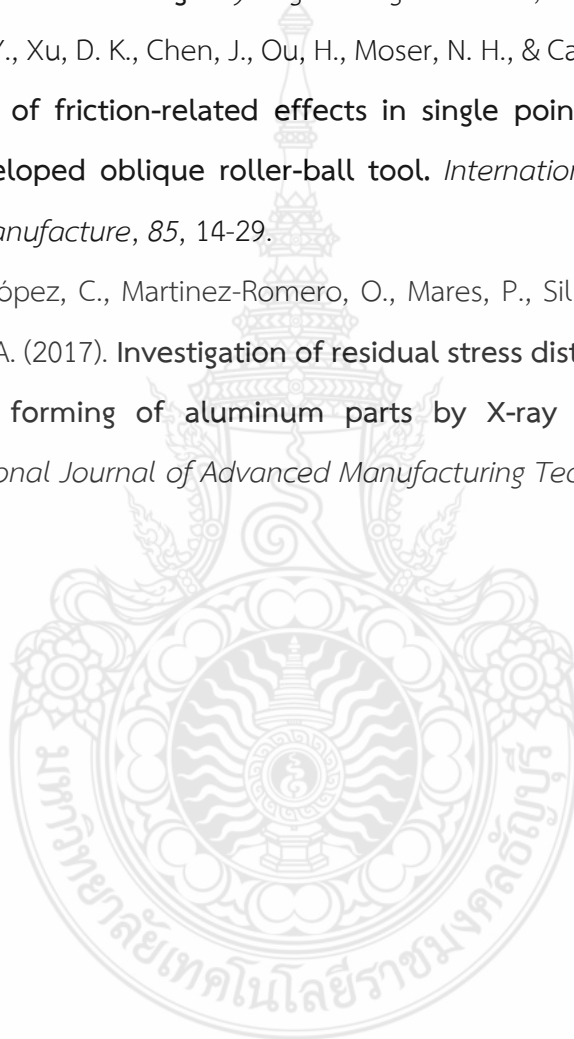
- [10] Nirala, H. K., & Agrawal, A. (2021). **Reprint of: Residual stress inclusion in the incrementally formed geometry using Fractal Geometry Based Incremental Toolpath (FGBIT).** Journal of Materials Processing Technology, 287, 116623.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] สีนีนารถ ธรรมสุนทร. **ความเค้น ตกค้าง บน ผิว วัสดุ ผสม Al₂O₃-TiC จาก กระบวนการ เจียระไน** (Doctoral dissertation, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย).
- [12] Tanaka, S., Nakamura, T., Hayakawa, K., Nakamura, H., & Motomura, K. (2007, May). **Residual stress in sheet metal parts made by incremental forming process.** In **AIP Conference Proceedings** (Vol. 908, No. 1, pp. 775-780). American Institute of Physics.
- [13] Maaß, F., Hahn, M., Dobecki, M., Thannhäuser, E., Tekkaya, A. E., & Reimers, W. (2019). **Influence of tool path strategies on the residual stress development in single point incremental forming.** Procedia Manufacturing, 29, 53-58.
- [14] Maaß, F., Hahn, M., & Tekkaya, A. E. (2020). **Interaction of process parameters, forming mechanisms, and residual stresses in single point incremental forming.** Metals, 10(5), 656.
- [15] Maaß, F., Gies, S., Dobecki, M., Brömmelhoff, K., Tekkaya, A. E., & Reimers, W. (2018, May). **Analysis of residual stress state in sheet metal parts processed by single point incremental forming.** In **AIP conference proceedings** (Vol. 1960, No. 1, p. 160017). AIP Publishing LLC.
- [16] Alinaghian, M., Alinaghian, I., & Honarpisheh, M. (2019). **Residual stress measurement of single point incremental formed Al/Cu bimetal using incremental hole-drilling method.** International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2(2), 131-139.
- [18] Arfa, H., Bahloul, R., & BelHadjSalah, H. (2013). **Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of**

- aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts.** *International journal of material forming*, 6, 483-510.
- [19] Azhiri, R. B., Rahimidehghan, F., Javidpour, F., Tekiyeh, R. M., Moussavifard, S. M., & Bideskan, A. S. (2020). **Optimization of single point incremental forming process using ball nose tool.** *Experimental Techniques*, 44, 75-84.
- [20] Mulay, A., Ben, B. S., Ismail, S., Kocanda, A., & Jasiński, C. (2018). **Performance evaluation of high-speed incremental sheet forming technology for AA5754 H22 aluminum and DC04 steel sheets.** *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, 1275-1287.
- [21] Sbayti, M., Bahloul, R., BelHadjSalah, H., & Zemzemi, F. (2018). **Optimization techniques applied to single point incremental forming process for biomedical application.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 1789-1804.
- [22] Najm, S. M., Paniti, I., Trzepieciński, T., Nama, S. A., Viharos, Z. J., & Jacso, A. (2021). **Parametric effects of single point incremental forming on hardness of AA1100 aluminium alloy sheets.** *Materials*, 14(23), 7263.
- [23] Liu, Z. B., Li, Y. L., Daniel, W. J. T., & Meehan, P. (2014). **Taguchi optimization of process parameters for forming time in incremental sheet forming process.** In *Materials science forum* (Vol. 773, pp. 137-143). Trans Tech Publications Ltd.
- [24] Chinnaiyan, P., & Jeevanantham, A. K. (2014). **Multi-objective optimization of single point incremental sheet forming of AA5052 using Taguchi based grey relational analysis coupled with principal component analysis.** *International journal of precision engineering and manufacturing*, 15(11), 2309-2316.
- [25] Jackson, K. (2005). **Incremental Sheet Forming.** Institute for Manufacturing, University of Cambridge.
- [26] Jeswiet, J., Adams, D., Doolan, M., McAnulty, T., & Gupta, P. (2015). **Single point and asymmetric incremental forming.** *Advances in manufacturing*, 3, 253-262.

- [27] Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ou, H., Moser, N. H., & Cao, J. (2014). **Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool.** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85, 14-29.
- [28] Skjødt, M., Hancock, M. H., & Bay, N. (2007). **Creating helical tool paths for single point incremental forming.** *Key Engineering Materials*, 344, 583-590.
- [30] Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ou, H., Moser, N. H., & Cao, J. (2014). **Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool.** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85, 14-29.
- [29] Jiménez, I., López, C., Martínez-Romero, O., Mares, P., Siller, H. R., Diabb, J., ... & Elías-Zúñiga, A. (2017). **Investigation of residual stress distribution in single point incremental forming of aluminum parts by X-ray diffraction technique.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 2571-2580



ภาคผนวก

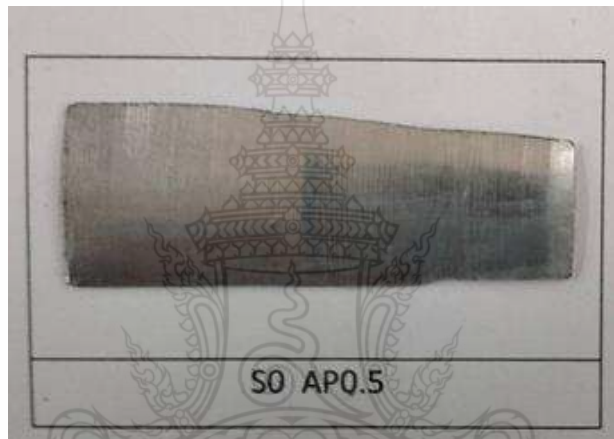




ภาคผนวก ก
ชิ้นงานก่อนวัดค่าความหยาบผิว



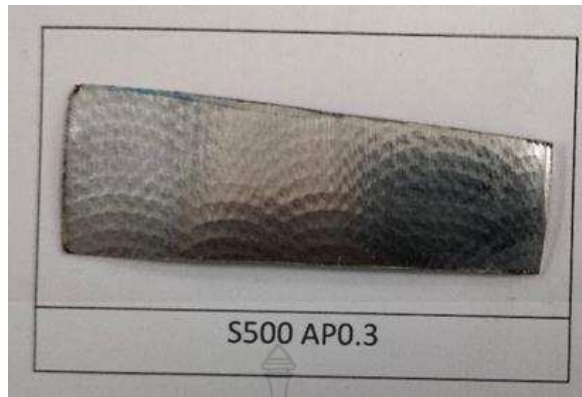
ก.1..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 0 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.3 มิลลิเมตร/รอบ



ก.2..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 0 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.5 มิลลิเมตร/รอบ



ก.3..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 0 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.7 มิลลิเมตร/รอบ



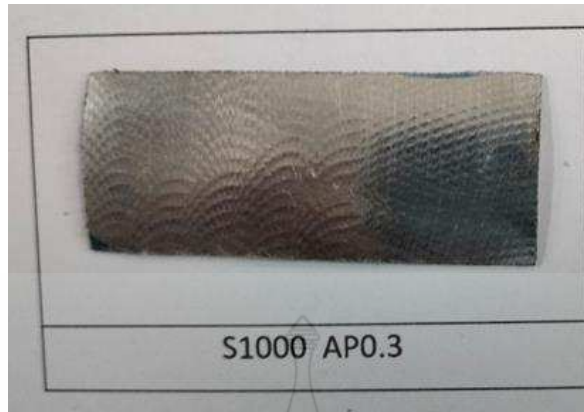
ก.4..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 500 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.3 มิลลิเมตร/รอบ



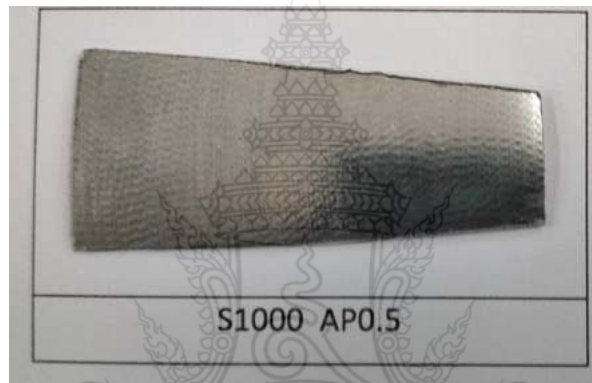
ก.5..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 500 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.5 มิลลิเมตร/รอบ



ก.6..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 1000 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.3 มิลลิเมตร/รอบ



ก.7..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 1000 รอบ/นาที ความลึกในการบ่อน 0.3 มิลลิเมตร/รอบ



ก.8..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 1000 รอบ/นาที ความลึกในการบ่อน 0.5 มิลลิเมตร/รอบ



ก.9..ชั้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 1000 รอบ/นาที ความลึกในการบ่อน 0.7 มิลลิเมตร/รอบ



ภาคผนวก ข
การวัดความหยابผิวหลังการขึ้นรูป



ข.1 การสอบเทียบเครื่องวัดความหนาให้พร้อมวัดความหนาผิว



ข.2 รูปแบบการวัดความหนาในแต่ละชั้นทดสอบ



ข.3 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 0 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.3 มิลลิเมตร/รอบ



ข.4 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 0 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.5 มิลลิเมตร/รอบ



ข.5 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 0 รอบ/นาที
ความลึกในการป้อน 0.7 มิลลิเมตร/รอบ



ข.6 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 500 รอบ/นาที
ความลึกในการป้อน 0.3 มิลลิเมตร/รอบ



ข.7 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 500 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.5 มิลลิเมตร/รอบ



ข.8 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกัด 500 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.7 มิลลิเมตร/รอบ



ข.9 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 1000 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.3 มิลลิเมตร/รอบ



ข.10 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 1000 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.5 มิลลิเมตร/รอบ

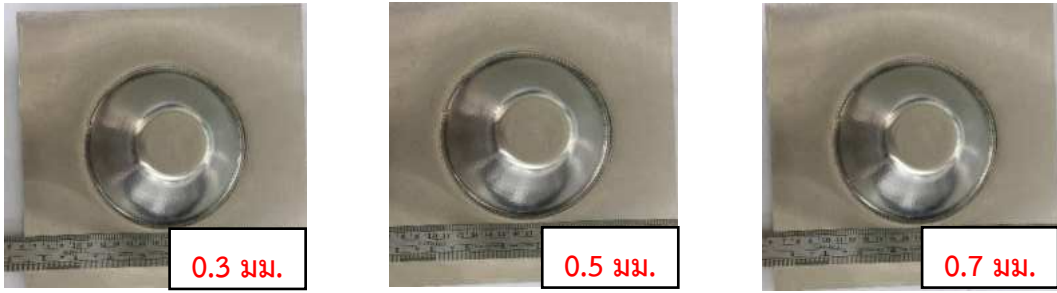


ข.11 ผลการวัดความหยาบของชิ้นทดสอบที่มีความเร็วรอบของหัวกด 1000 รอบ/นาที ความลึกในการป้อน 0.7 มิลลิเมตร/รอบ





ภาคผนวก ค
ชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป



ค.1..ชิ้นงานที่มีความเร็วรอบของหัวกด 0 RPM ความลึกในการป้อน 0.3,0.5 และ0.7 มม.



ค.2..ชิ้นงานที่มีความเร็วรอบของหัวกด 500 RPM ความลึกในการป้อน 0.3,0.5 และ0.7 มม.



ค.3..ชิ้นงานที่มีความเร็วรอบของหัวกด 1,000 RPM ความลึกในการป้อน 0.3,0.5และ0.7 มม.



ค.4..หัวกดส่วนก้านทำจากเหล็กSKD11 ส่วนปลายเป็น Steel Ball Bearing



ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



**The 5th Rajamangala Manufacturing and Management
Technology Conference 2020**

การประชุมวิชาการราชมนเกล้าด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 5



Production Technology and Management for Improving Smart Farming

Proceedings

Conference 2020

3-4 September 2020, K.P. Grand Hotel Chanthaburi

www.rmttc2020.org



Conference Topics

- Production and Operations Management
- Manufacturing engineering
- Materials Science and Applications
- Supply Chain and Logistics
- Industrial Education
- Other Related fields



อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องต่อความเครียด ความเรียบผิว และสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม Al5052

Influence of incremental forming variable on Strain , Surface roughness and mechanical properties of aluminums alloy Al5052

เกียรติพงษ์ อ่อนบัว¹ สุริยา ประสมทอง² และ ศิริชัย ต้อสกุล³

^{1,3} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

E-mail: kiattipong_b@email.mutt.ac.th*

Kiattipong Onbat ^{1*} Suriya Prasomthong² and Sirichai Torsakul³

^{1,3} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

² Industrial Technology, Faculty of industrial Technology, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom E-mail: kiattipong_o@mail.mutt.ac.th*

บทคัดย่อ

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการขึ้นรูปเทคนิคใหม่ที่เริ่มมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปจึงต้องมีการศึกษาวิธีการและตัวแปรในการขึ้นรูปที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบการขึ้นรูป 0-1,000 rpm และความลึกในการกัด 0.3-0.7 มม. ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ 1,500 มม./นาที บนอลูมิเนียมผสม Al5052 ชิ้นงานทดลองรูปทรงกรวยมุม 25 องศา ขนาดปากกรวย 100 มม. และก้นกรวย 51 มม. ทำการตรวจสอบความเครียด ความเรียบผิว และสมบัติทางกลของผนังชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จากการทดลองพบว่าความเร็วรอบและระยะการกัดขึ้นรูปต่ำพฤติกรรมความเครียดมักเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนหลักแต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการขึ้นรูปสูงขึ้นพฤติกรรมของวัสดุมีแนวโน้มการยึดสองแกน ความแข็งแรงและความหนาผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

คำหลัก การขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง/ความเครียด/ความเรียบผิว/สมบัติทางกล

Abstract

Incremental forming process is a new technique forming process that is widely used in the industry. In order to develop the forming process, there must be an appropriate study of the molding methods and variables. Therefore, this research studies the influence of forming variables. Therefore, this research studied the effect of forming speed from 0-1,000 rpm and the depth of cut 0.3-0.7 mm at the feed of the tool 1,500 mm/min on aluminum alloy Al5052. The specimen was 25 degree cone-shaped, 100 mm outer diameter and 51 mm inner diameter. Investigation was strain behavior, surface roughness and strength of workpieces. From the experiment, it was found that the rotational speed and depth of cut are low, the stress behavior tends to change Uniaxial tension, but when the speed of the forming increases, the behavior of the material tends to Biaxial tension. The strength and surface roughness are increased.

Keywords: Incremental forming /Strain/Surface roughness/Mechanical properties



ตามตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการตรวจสอบ การตรวจสอบต่อไป

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นอลูมิเนียม Al 5052

Alloy	Element (%wt)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	-	Bal.

2.2 ความเครียด ความเรียบผิว และสมบัติทางกล

หลังจากขึ้นรูปทำการตัดชิ้นงานทดสอบความเครียดทำการวัดวงกลมกริดหลังจากการขึ้นรูปตามทิศทางแกนหลัก (Major strain) และแกนรอง (Minor strain) เพื่อทำการเปรียบเทียบความเครียดหลังการขึ้นรูประหว่างสองกระบวนการโดยการคำนวณความเครียดตั้งสมการที่ 1 และทำการวัดความเรียบผิวเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM D7127 และทำการตัดชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 (Sub size) เพื่อหาค่าแรงดึงของผนังชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

รูปที่ 1 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในการทดลอง

3. ผลการวิจัย

การศึกษากระบวนการขึ้นต่อเนื่องแบบลิ่มผสมสองจุดโดยทำการเปรียบเทียบตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปมีผลการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ตัวแปรการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง TISF

ตัวแปรในการทดสอบ	ค่าตัวแปร
Inner diameter (mm)	51
Outer diameter (mm)	60
High (mm)	60
wall angle	25
Feed (mm/min)	1500
Depth of cut (mm)	0.3,0.5,0.7
Speed (rpm)	0,500,1000



รูปที่ 2 การจับยึดชิ้นงานและการขึ้นรูปแบบ TPIF

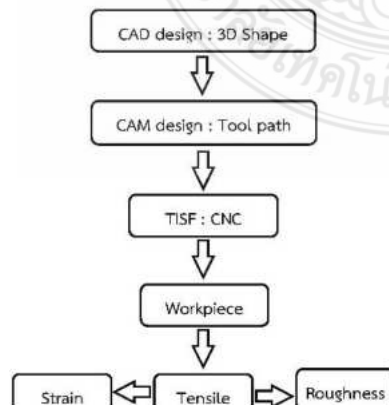
$$\epsilon_1 = \ln(d_1 / d_2) ; \epsilon_2 = \ln(d_2 / d_0) \quad (1)$$

โดยที่ ϵ_1, ϵ_2 คือ ความเครียดหลักและความเครียดรอง

d_1 คือ การเปลี่ยนแปลงแนวแกนหลัก

d_2 คือ การเปลี่ยนแปลงแนวแกนรอง

d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



3.1 ความเครียดหลังการขึ้นรูป

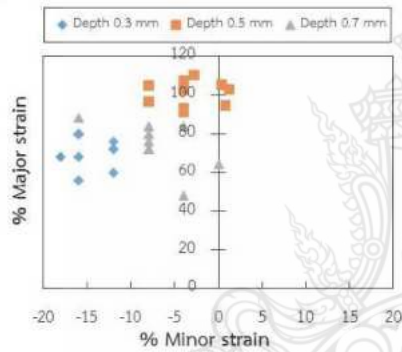
ความเครียดหลังการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3-5 เมื่อเทียบกับขีดจำกัดการขึ้นรูปทั่วไป (Conventional Forming limit diagram) พบว่าที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูปที่ 0 rpm ความลึกในการกด 0.3-0.7 mm ลักษณะพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบผสมระหว่างยึดตามแนวแกนหลัก (Plane strain) รวมกับการยึดตามแนวแกน (Uniaxial tension) และพฤติกรรมการยึดแบบเฉือน (Pure shear) ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นทำการเพิ่มความเร็วรอบในการกดขึ้นรูปเป็น 500 rpm พฤติกรรมของวัสดุเฉลี่ยโดยรวมหลังการขึ้นรูปเป็นแบบยึดตามแนวแกนหลัก (Plane strain) ดังแสดงในรูปที่ 4 แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการขึ้นรูปเป็น 1000 rpm พฤติกรรมความเครียดของวัสดุหลังการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลง



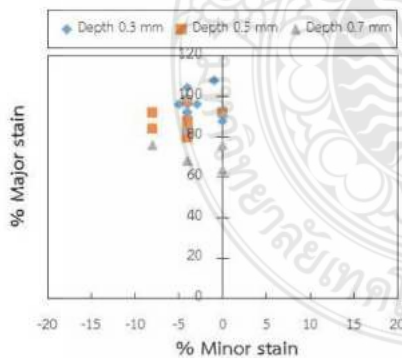
เป็นการยึดทั้งสองแกน (Biaxial tension) ดังรูปที่ 5

3.2. ความแข็งแรง

ชิ้นงานทดสอบแรงดึงทำการตัดขวางกับทิศทางการขึ้นรูปผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูปที่ 0 rpm ความลึกในการกด 0.3 มม. ความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่ 121.33 MPa เมื่อเพิ่มความลึกในการกดขึ้นรูปเป็น 0.5 มม. และ 0.7 มม. ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 131.67 และ 145 MPa ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มความเร็วรอบในการขึ้นรูปเป็น 500 และ 1000 rpm ลักษณะค่าความแข็งแรงดึงคล้ายกับไม่ใช้ความเร็วรอบในการขึ้นรูปแต่ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 3 ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm

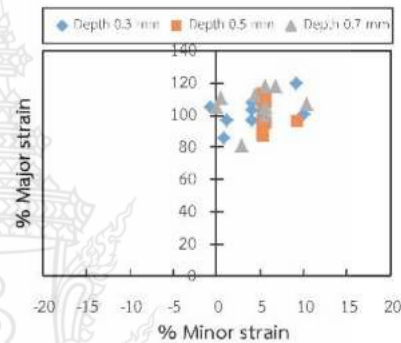


รูปที่ 4 ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 500 rpm

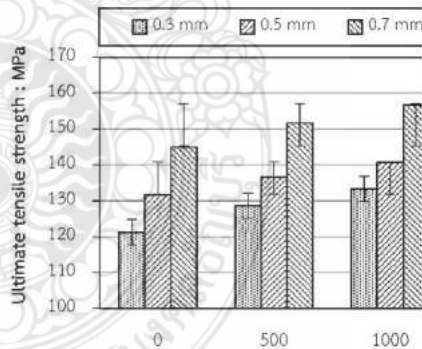
3.3 ความเรียบผิว

ความเรียบผิวทำการวัดบริเวณผนังชิ้นงานที่สัมผัสกับเครื่องมือกดขึ้นรูปโดยตรง ทำการวัดบริเวณกึ่งกลางด้านบน และด้านล่างจากนั้นนำค่าความเรียบผิวที่วัดมาทำ

การเฉลี่ยเป็นค่าความเรียบผิวของชิ้นงานผลการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0 rpm ความลึกในการกดขึ้นรูป 0.3 มม. ค่าความเรียบผิวต่ำสุดเฉลี่ย 0.85 μm เมื่อเพิ่มความลึกในการกดขึ้นรูปสูงขึ้นเป็น 0.5 และ 0.7 มม. ค่าความเรียบผิวมีค่าสูงขึ้นเป็น 1.24 และ 1.51 μm เช่นเดียวกันกับเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการขึ้นรูปสูงขึ้นค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปผลการทดลองที่ 7 ซึ่ให้เห็นว่าความลึกในการกด และความเร็วยรอบส่งผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานอย่างชัดเจน



รูปที่ 5 ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 1000 rpm



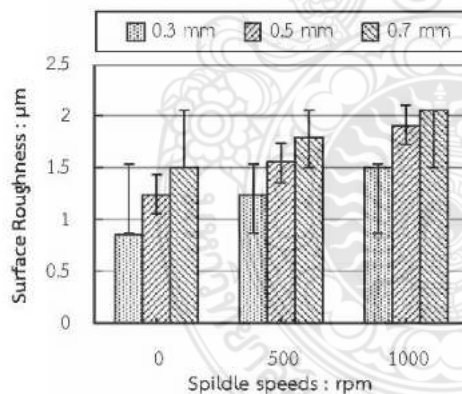
รูปที่ 6 ความเร็วรอบและความลึกในการกดต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

4. อภิปรายผล

การดำเนินการทดลองอิทธิพลของตัวแปรต่อความเครียด ความเรียบผิวและความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (TISF) พบว่าตัวแปรการขึ้นรูปส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุอย่างชัดเจนดังแสดงในผลการทดลองรูปที่ 3-5 ความเร็วรอบในการขึ้นรูปมี



ผลต่อการไหลของเนื้อวัสดุทำให้เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากการยึดตามแนวแกน (Uniaxial tension) เป็นการยึดสองแกน (Biaxial tension) ดังรูปที่ 8 ทำการเปรียบเทียบความเครียดของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูป 0-1000 rpm ความลึกในการกัด 0.5 มม. แต่ในกรณีของความแข็งแรงกลับพบว่าความละเอียดในการกัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของผนังชิ้นงานแนวโน้มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่ความเร็วรอบในการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่ 1000 rpm ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 156.67 MPa เนื่องจากระยะในการกัดขึ้นรูปส่งผลต่อการลดรูปของผนังชิ้นงาน กล่าวคือที่ระยะกัดขึ้นรูปต่ำการลดรูปของผนังชิ้นงานตามแนวแกนสูงทำให้เกิดพฤติกรรมของวัสดุเป็นการยึดแกนเดียวส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดลดลงจึงส่งผลต่อค่าความแข็งแรง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มระยะในการกัดขึ้นรูปสูงขึ้นการยึดตัวของวัสดุจะเปลี่ยนเป็นการยึดสองแกนส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น แต่ในกรณีของความเรียบผิวที่ความเร็วรอบเป็น 0 rpm และที่ระยะกัดลึกต่ำความหยาบผิวมีค่าลดลง



รูปที่ 7 ความเร็วรอบและความลึกในการกัดต่อความเรียบผิว

5. สรุป

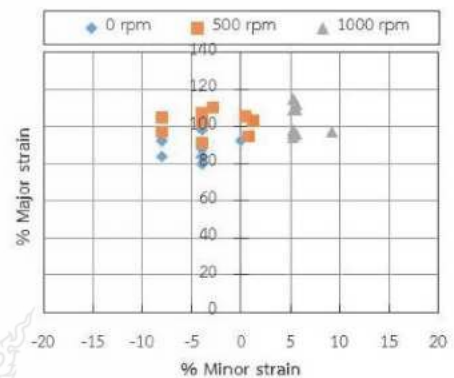
การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องต่อความเครียด ความเรียบผิว และสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม Al5052 ด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ความเร็วรอบในการขึ้นรูปส่งผลต่อพฤติกรรมความเครียดของวัสดุที่ความเร็วรอบต่ำพฤติกรรมวัสดุโดยรวมเป็นแบบการยึดแกนเดียวแต่แนวโน้มของความเร็วรอบสูงพฤติกรรมความเครียดเป็นแบบการยึดสองแกน แต่ความลึกในการกัดไม่ส่งผลต่อความเครียดมากนัก

5.2 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปสำหรับ

การทดลองนี้พบว่าระยะกัดลึกและความเร็วรอบสูงขึ้นแนวโน้มค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

5.2 ความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการขึ้นรูปและระยะในการกัดลึกสูงขึ้น



รูปที่ 8 เปรียบเทียบความเร็วรอบการขึ้นรูป 0-1000 rpm

6. กิตติกรรมประกาศ

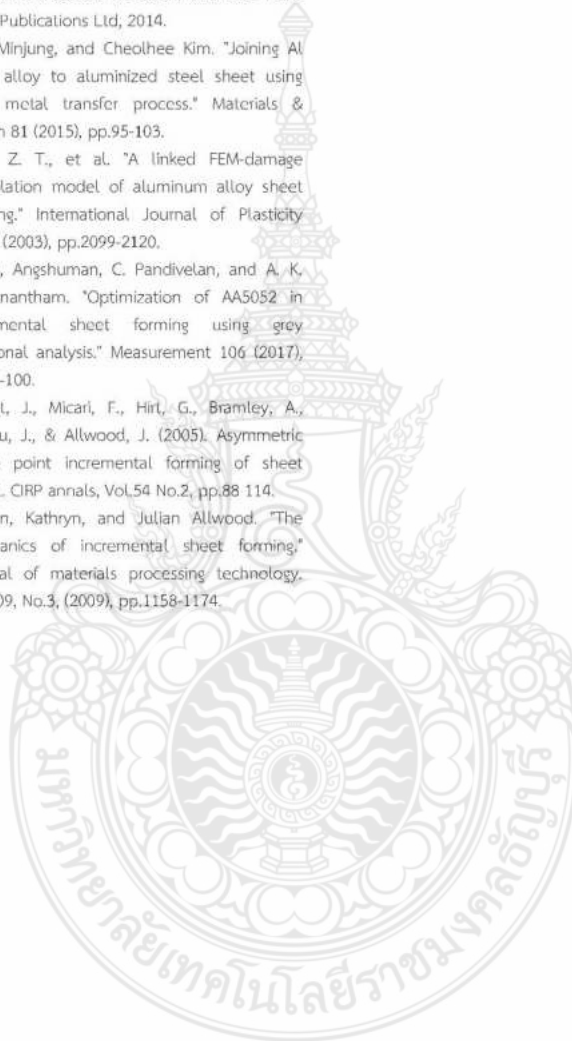
บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือในการทดลองการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงจากสาขาวิชาช่างกลโรงงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., & Muzzupappa, M. (2005). Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.162, pp .156-162.
- [2] Makadia, A. J., & Nanavati, J. I. (2013). Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. *Measurement*, Vol.46, No. 4, pp .1521-1529.
- [3] Hussain, G., Gao, L., & Hayat, N. (2011). Forming parameters and forming defects in incremental forming of an aluminum sheet: correlation, empirical modeling, and optimization: part A. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.26 No. 12, pp.1546-1553.



- [4] Mugendiran, V., A. Gnanavelbabu, and R. Ramadoss. "Tensile behaviour of Al5052 alloy sheets annealed at different temperatures." *Advanced Materials Research*, Vol. 845. Trans Tech Publications Ltd, 2014.
- [5] Kang, Minjung, and Cheolhee Kim. "Joining Al 5052 alloy to aluminized steel sheet using cold metal transfer process." *Materials & Design* 81 (2015), pp.95-103.
- [6] Chen, Z. T., et al. "A linked FEM-damage percolation model of aluminum alloy sheet forming." *International Journal of Plasticity* 19.12 (2003), pp.2099-2120.
- [7] Baruah, Angshuman, C. Pandivelan, and A. K. Jeevanantham. "Optimization of AA5052 in incremental sheet forming using grey relational analysis." *Measurement* 106 (2017), pp.95-100.
- [8] Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., & Allwood, J. (2005). Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CRP annals*, Vol.54 No.2, pp.88-114.
- [9] Jackson, Kathryn, and Julian Allwood. "The mechanics of incremental sheet forming." *Journal of materials processing technology*, Vol.209, No.3, (2009), pp.1158-1174.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายเกียรติพงษ์ อ่อนบัตร
วัน เดือน ปีเกิด	8 ตุลาคม 2531
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคนครพนม ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศบ.) สาขาวิชาวิศวกรรม อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
ประสบการณ์การทำงาน	อาจารย์สอน สาขาวิชาช่างกลโรงงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
อีเมลล์	Kiattipong_o@mail.mutt.ac.th



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

เกษมพงษ์

(นายเกียรติพงษ์ อ่อนบัตร์)

