

การวิเคราะห์หาแรงจับยึดชิ้นงานสำหรับการลากขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียม

โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Finite Element Analysis of Blank Holder Force in Drawing

Process of Aluminum Frying Pan

ภกน รัตน์อุดม* และ เสกสรร ไชยจิตต์

สาขาเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนน พระรามที่ 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Pakin Ratana-u-dom* and Seksan Chaijit

Advance Manufacturing Technology Engineering Pathumwan Institute of Technology

833 Rama 1 Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.

E-mail pakin.r@pit.ac.th, seksan@pit.ac.th

บทคัดย่อ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ห้ขบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อลดขั้นตอนการออกแบบคาย การลากขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียมแบบขึ้นรูปขึ้นตอนเดียวมักพบการแตก และการ ย่นของชิ้นงานอันเนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขการขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลกระทบของรัศมีคายและแรงจับยึดชิ้นงาน ที่มีผลต่อการเกิดรอยย่น และการฉีกขาดในขบวนการลากขึ้นรูป กระทะอลูมิเนียม การทดลองลากขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียม A1100-H24 มีความหนา 2.2 มม. มีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 310 มม. ลึก 80 มม. งานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ใช้ เพื่อหาค่าแรงจับยึดชิ้นงานและรัศมีคายที่เหมาะสม แบบจำลอง FEM ภายใต้เงื่อนไขพฤติกรรมวัสดุแบบอีลาสโต พลาสติก จากผลการศึกษาทั้งการทดลองและการจำลองทางวิศวกรรมพบว่าขนาดของแรงจับยึดชิ้นงานที่ เหมาะสมอยู่ที่ 133 kN โดยการใช้รัศมีคายขนาด 3 มม. โดยไม่ส่งผลกระทบต่อรอยย่นและการฉีกขาดของ ชิ้นงาน รัศมีคายจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุขณะขึ้นรูป และควรออกแบบคายให้มีครอปิทเพื่อ ควบคุมการไหลของวัสดุ

คำสำคัญ: การลากขึ้นรูป, แรงจับยึดชิ้นงาน, รัศมีคาย, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Finite element method has been widely employed in the analysis of sheet metal forming to reduce the die process. Many problems such as the wrinkle and fracture are caused in the single-step deep drawing process of an aluminum frying due to trial and error in the forming conditions. This study aimed to investigate the effects of blank holder force on wrinkle and fracture in the deep drawing of an aluminum frying pan. An aluminum A1100-H24 has diameter 310 mm and 2.2 mm thickness. The forming depth 80 mm by employed in the experimental with single step deep drawing force. This study adopted non-linear finite element method to examine a proper blank holder force and die radius using a FEM simulation under the elasto-plastic with strain hardening. The results from both the experiment and engineering simulation showed that the proper blank holder force at 133 kN with 3 mm die radius does not affect wrinkle and fracture of the model. It was also found that die radius influences the flow of the metal during the deep drawing. It is suggested that the die be designed to have drawn bead in order to control the flow of the metal.

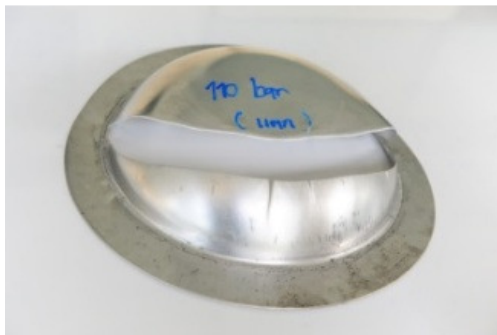
Keyword: Deep drawing, Blank holder force, Die radius, finite element method

1. บทนำ

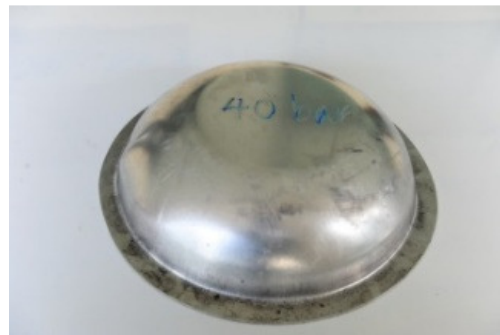
กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ครัวเรือน เป็นต้น [1] การขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตผลิตภัณฑ์ครัวเรือน เช่น กระทะ อลูมิเนียม ถาดอาหาร หม้อทอด ต้องการความแม่นยำ ความเที่ยงตรงและคุณภาพของชิ้นงานที่สูง รวมทั้งต้องการลดขั้นตอนในการผลิตให้น้อยที่สุด การขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตผลิตภัณฑ์ครัวเรือนมักจะมีปัญหาการเกิดรอยย่น (Wrinkling) การฉีกขาด (Rupture) และการสปริงตัวกลับ (Spring back) ทั้งนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการกำหนดค่าตัวแปรกระบวนการผลิตต่างๆ ที่สำคัญ เช่น แรงกดของตัวประสานหรือแรงจับยึดแบบลวด ตำแหน่งของดรอว์บีค และขนาดรูปร่างของแบบลวด เป็นต้น [2-4] เนื่องจากการแข่งขันในอุตสาหกรรมผลิตภาชนะครัวเรือนด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหรืออลูมิเนียม ผู้ผลิตต้องการใช้วัสดุเบา และลดความหนาหลง เพื่อลดต้นทุนการผลิตลง เป็นผลให้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน เกิดความเสียหายระหว่างการขึ้นรูป เช่น การฉีกขาด เกิดรอยย่นจากปัญหาดังกล่าว หลายงานวิจัย [5-6] ได้นำเทคนิคการวิเคราะห์โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเป็นองค์ความรู้ประกอบการตัดสินใจในการออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดขั้นตอนการผลิตให้เหมาะสมถูกต้องมากที่สุด ตลอดจนสามารถช่วยวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิต ช่วยลดการลองผิดลองถูก เป็นผลให้ประหยัดค่าใช้จ่าย เวลา ลดต้นทุนการสูญเสียของวัตถุดิบ และจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันในตลาดโลกแก่ผู้ผลิตไทย

ปัญหาการผลิตกระทะอลูมิเนียมของบริษัท ไทยสแตนเลสสตีล จำกัด ซึ่งขึ้นรูปจากวัสดุอลูมิเนียมเกรด A1100-H24 มีความหนา 2.2 มม. พบว่ามักเกิดการฉีกขาดและเกิดรอยย่นขณะการขึ้นรูป อันเนื่องจากการลดความหนาหลง การลดขบวนการขึ้นรูปเป็นแบบขึ้นตอนตอนเดียว การออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดเงื่อนไขการขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 1 ผลงานวิจัยหลายฉบับ[7-9] ได้ศึกษาผลกระทบของขบวนการผลิตหรือวัสดุต่อขบวนการขึ้นรูปลึก ซึ่งพบว่านอกจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีผลกระทบต่อารออกแบบและควบคุมการผลิตของขบวนการขึ้นรูปลึกแล้ว ผู้ผลิตยังต้องคำนึงถึงการกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์และกลไกการเสียรูปอย่างถาวรของวัสดุด้วย

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงจับยึดชิ้นงานและรัศมีมุมคายของการขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียมโดยการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Method) สร้างแบบจำลอง และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง เพื่อทำนายการเกิดความเสียหายและเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลกับการทดลองจริง มาใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงจับยึดชิ้นงาน (Bank Holder Force) และค่ารัศมีมุมคายที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียม



(ก) รอยแตก



(ข) รอยย่น

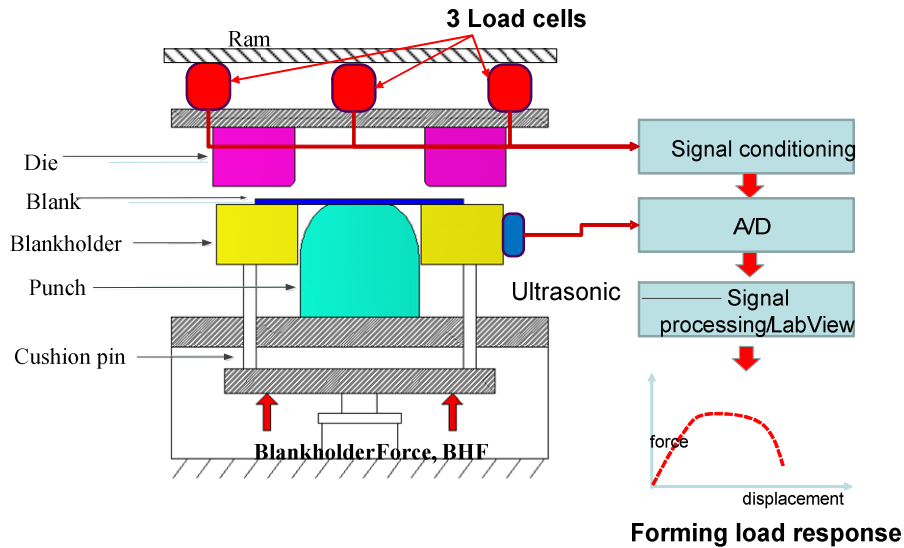
รูปที่ 1 ความเสียหายอันเนื่องจาก (ก) การฉีกขาด และ (ข) รอยย่น ของ กระทะอลูมิเนียม

2. การทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 ชุดแม่พิมพ์

กระบวนการขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียมนั้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ คือ แผ่นชิ้นงาน (Blank) ตัวจับยึดชิ้นงาน (Blank holder) แม่พิมพ์ (Die) และหัวกด (Punch) ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นการขึ้นรูปแบบขึ้นตอนเดียว ชุดหัวกดกับตัวจับยึดชิ้นงานจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งชุดหัวกดจะไม่มีเคลื่อนที่ ชุดแม่พิมพ์ จะอยู่ในตำแหน่งบนและจะเคลื่อนที่ลงมาตามทิศทางแรงกดของแรมเครื่องปั๊ม ในการทำงาน ตัวจับยึดชิ้นงานจะเคลื่อนที่ขึ้นมาเสมอกับผิวด้านบนของ Punch แผ่นชิ้นงานจะถูกวางบนตัวจับยึดชิ้นงาน โดยมีหน้าที่ในการออกแรงต้านกับทิศทางของแรงกดของ Die เพื่อควบคุมการไหลของวัสดุหรือเป็นการป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดการย่น จากนั้นชุด Die จะค่อยๆ เคลื่อนที่ลงมากดแผ่นชิ้นงานจนสุดช่วงชัก (Stroke)

อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแรง (Load cell) ขนาด 30 ตัน จำนวน 3 ตัว และอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางการขึ้นรูป (Ultrasonic sensor) ถูกติดตั้งในชุดแม่พิมพ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมแรงขึ้นรูปและความสัมพันธ์ระหว่างแรงขึ้นรูป (Forming force, F_f) และระยะกดขึ้นรูป (Depth, d) สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงจะผ่านชุดประมวลผลสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่ถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงแม่พิมพ์ขึ้นรูปและการประมวลผลสัญญาณ

แรงจับยึดชิ้นงาน (Blankholder force, F_B) เกิดจากแรง cushion pin ของเครื่องปั๊มที่ส่งผ่านตัวกดชิ้นงาน ในทิศทางด้านการเคลื่อนที่ของชุดแม่พิมพ์โดยถูกลดความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและตัวจับยึดชิ้นงานด้วย น้ำมันหล่อลื่น โดยกำหนดค่าแรงจับยึดชิ้นงานจากเกจวัดแรงดันน้ำมันของชุดจับชิ้นงานในเครื่องปั๊มไฮดรอลิกส์ ที่แรงดัน 40, 60, 100, 140 และ 160 บาร์ ให้แรงจับยึดชิ้นงานเท่ากับ 133, 200, 333, 466 และ 533 kN ซึ่งการคำนวณแรงจับยึดชิ้นงานในการขึ้นรูปหาได้จากสมการ [10]

$$F_B = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d' + 2R_d)^2] \cdot p \quad (1)$$

เมื่อ	F_B	คือแรงกดชิ้นงาน (N)
	D	คือเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานก่อนขึ้นรูป (mm)
	d'	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของพินซ์ (mm)
	R_d	รัศมีของมุมคาย (mm)
	p	ค่าคงที่ของวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม 1.2 – 1.5 N/mm^2

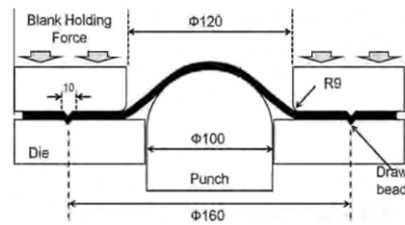
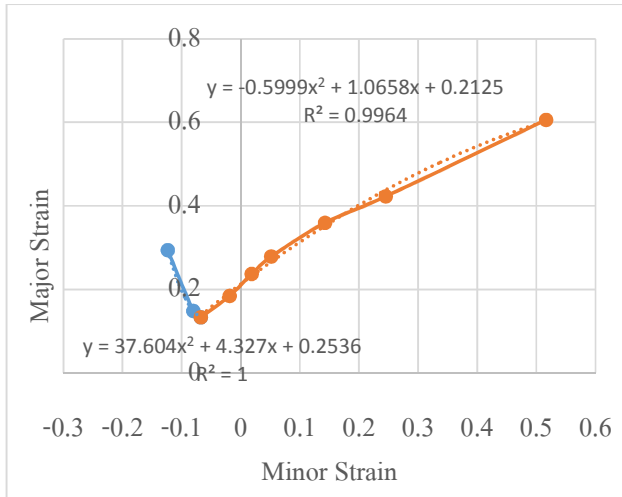
2.2 คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)

วัสดุของชิ้นงานที่ใช้เป็นอลูมิเนียมเกรด A1100-H24 มีความหนา 2.2 มม. ผ่านกระบวนการรีดเย็น ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropy) [11] ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของโลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการรีด (Rolling) คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียม A1100-H24 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม: A1100-H24

คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม: A1100-H24			
คุณสมบัติ	0	45	90
Young's modulus, E /GPa	37.07	31.00	35.67
Yield stress, σ /MPa	71.34	70.87	72.39
Ultimate strength, σ_u /MPa	102.73	101.39	102.34
Elongation %	35.35	36.45	32.45
r value	0.65	0.87	0.86
n value	0.13	0.12	0.11
K value /MPa	152.65	148.81	147.77

ได้มีการตัดชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดความกว้างและรูปทรงที่แตกต่างกันตั้งแต่ 55 มม. ถึง 195 มม.[12] โดยแม่พิมพ์มีตรอบีครูปตัววีและตัวจับยึดชิ้นงาน ยึดแผ่นชิ้นงานไม่ให้ชิ้นงานไหลในขณะขึ้นรูปชิ้นงาน ชุดหัวกดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. ขึ้นรูปด้วยความเร็วกดคงที่ด้วยเครื่อง ERICHSEN รุ่น 142/40 ตามวิธีการทดสอบ Nakazima [13] จากนั้นจึงวัดความเครียดของชิ้นงานจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดบนชิ้นงานมาพล็อตกราฟ เพื่อคำนวณหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3 แสดงการหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของอลูมิเนียม A1100-H24 การทดสอบหาค่าขีดจำกัดการขึ้นรูปทดสอบด้วย บีมขึ้นรูปด้วยพันธรูปทรงครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. จากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถจำแนกจุดที่มีแนวโน้มจะมีปัญหาและสามารถจะประเมินความรุนแรงของปัญหาได้ แม้ว่าจะไม่เกิดความเสียหาย ถ้าความเครียดที่ได้มีค่าใกล้เส้นโค้งความเสียหายก็อาจเกิดความเสียหายในกระบวนการผลิต เพราะเกิดจากเครื่องมือสึกหรอและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การหล่อลื่น แนวของเครื่องมือหรือความหนาและคุณสมบัติของวัสดุ



ไดอะแกรมเครื่องทดสอบ



ชิ้นงานทดสอบ [13]

รูปที่ 3 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ อลูมิเนียม A1100-H24

2.3 แบบจำลองระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรม Altair Hyperworks [14] ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์ในขบวนการขึ้นรูปกระบวนการเดียว เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงจับยึดแผ่นวัสดุและค่ารัศมีมุมคายที่เหมาะสมของกระทะอลูมิเนียม การสร้างแบบจำลองการขึ้นรูปลึกริเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองตาข่าย (Mesh Model) เพื่อการแบ่งเอลิเมนต์ (Elements) ของแม่พิมพ์แต่ละชุดและแบลนค์ โดยแบบจำลองตาข่ายของวัตถุ Die, Binder, Punch และ Blank แสดงดังรูปที่ 4 ในการวิเคราะห์แบบจำลองลากขึ้นรูปลึกริของกระทะอลูมิเนียม พันธ์และคายมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 303 มม. และ 308 มม.ตามลำดับ แผ่นจับยึดชิ้นงานกำหนดให้เป็นวัสดุแบบแข็งเกร็ง (Rigid Bodies) ซึ่งไม่มีการเสียรูป และแผ่นชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 408 มม. ความหนา 2.2 มม. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบเสียรูปได้ (Deformable body) โดยใช้เอลิเมนต์แบบเปลือก (Shell Element) เนื่องจากการเสียรูปของชิ้นงานเป็นแบบ Large strain plasticity ส่งผลให้อิเล็กเมนต์เกิดความเสียหายไม่สามารถคำนวณได้ จึงอาศัยเทคนิค Automatic adaptive remeshing สำหรับการจัดการอิเล็กเมนต์ โดยเมื่ออิเล็กเมนต์เกิดการเสียรูปอย่างหนักจะมีขบวนการปรับปรุงอิเล็กเมนต์ใหม่ให้มีความถูกต้อง และเพื่อลดเวลาการประมวลผล การกำหนดความหนาแน่นของอิเล็กเมนต์บริเวณการตัดถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแบบจำลองนี้

แบบจำลองวัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบ elasto-plastic with strain hardening ความสัมพันธ์ของความเค้นจริงและความเครียดจริงประสิทธิผล ในรูปแบบกฏยกกำลัง (Power Law) และเส้นการไหล (Flow curve) ของวัสดุจากสมการ

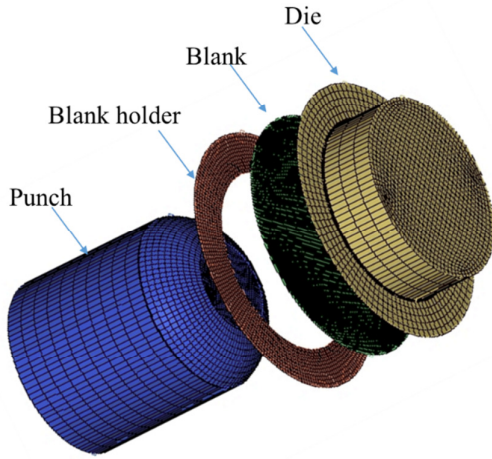
$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง(Hardening coefficient) [MPa]

ϵ คือ ความเครียด (effective strain)

n คือ เลขชี้กำลังทำให้แข็งด้วยความเครียด

กำหนดเงื่อนไขแบบจำลองขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียม มีความลึก 80 มม. ซึ่งกำหนดรัศมีมุมคายมีขนาด 3, 6 และ 8 มม. และแรงในการจับยึดชิ้นงาน 133, 200, 333, 466 และ 533 kN เงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูปลึกตามข้อมูลที่ใช้จริงในโรงงานดังแสดงในตารางที่ 2 พฤติกรรมความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์เป็นไปตามกฎของ Coulomb's ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของคู่สัมผัสมีค่าเป็น 0.04



รูปที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 2 ข้อมูลการขึ้นรูปลึก

ความหนาแผ่นชิ้นงาน	2.2 มม.
ขนาดแผ่นชิ้นงาน	408 มม
แรงจับยึดชิ้นงาน, F_B	133, 200, 333, 466, 533kN
รัศมีมุมคาย, R_d	3, 6, 8 มม.
ความเร็วขึ้นรูป	-5000 mm/s
ความลึกขึ้นรูป	80 มม.
ช่องว่างคาย	2.2 มม.

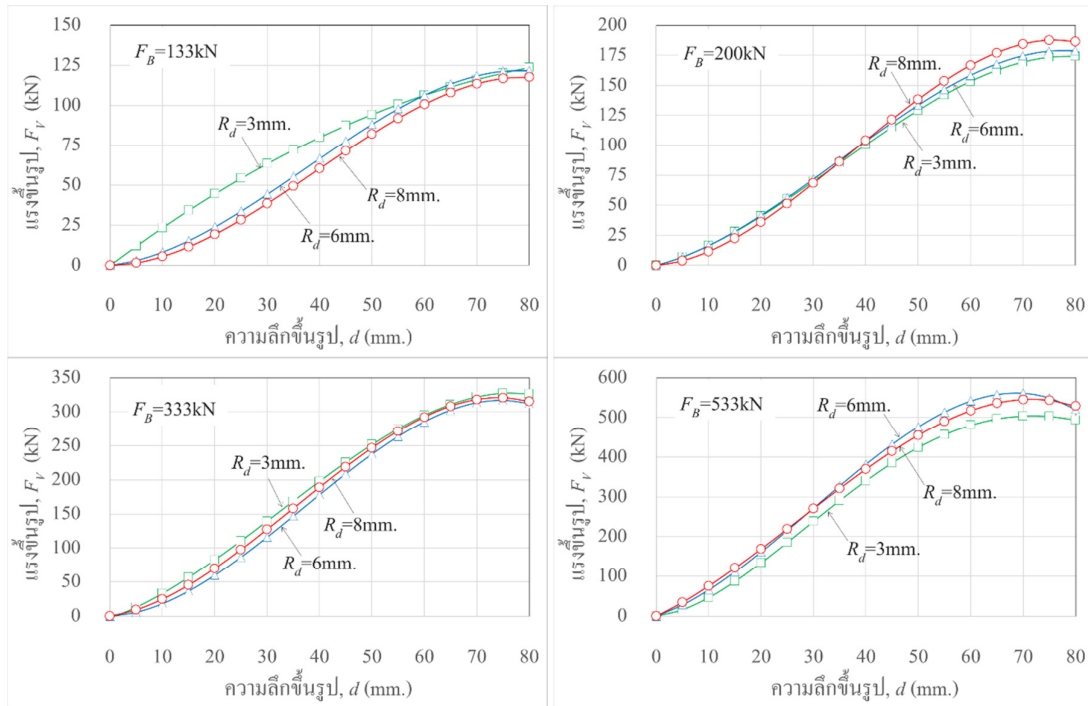
3.การวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมของแรงขึ้นรูป

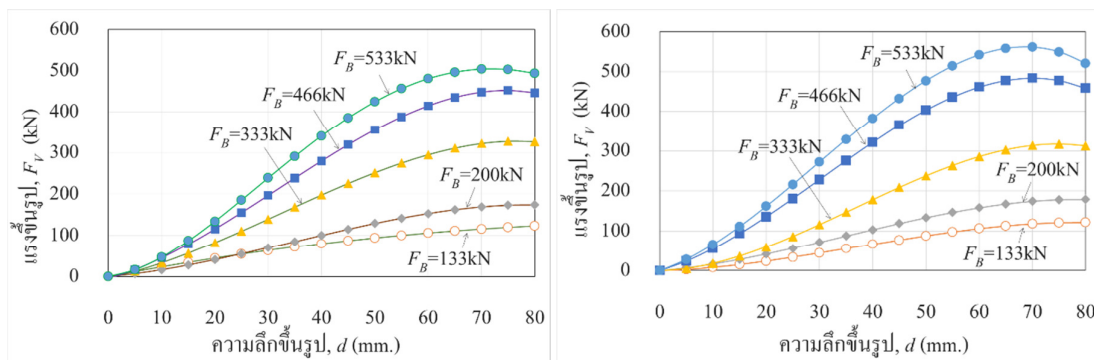
รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงขึ้นรูป F_v และความลึกขึ้นรูป d ที่รัศมีมุมคาย $R_d=3, 6$ และ 8 มม. โดยกำหนดให้แรงจับยึดชิ้นงาน $F_B=133$ kN, 200 kN, 333 kN และ 533 kN การทดลองใช้น้ำมันเป็นสารหล่อลื่นระหว่างแผ่นชิ้นงานและแม่พิมพ์ ผลตอบสนองของแรงขึ้นรูปต่อรัศมีมุมคายมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางของแรงบีบขึ้นรูป ที่ค่าแรงจับยึดเดียวกันรัศมีคายที่ต่างกันพบว่าความชันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่ารัศมีคายมีผลกับความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงระยะทางน้อยมากที่ช่องว่างคายคงที่

ผลตอบสนองของแรงขึ้นรูปต่อรัศมีคายเมื่อนำค่าแรงต่างๆมาเปรียบเทียบที่รัศมีคายเดียวกัน พบว่าความชันของกราฟความสัมพันธ์แรงกับระยะทางจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ค่าแรงกดแผ่นชิ้นงานเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6

เมื่อเปรียบเทียบความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางของแรงบีบขึ้นรูป ที่รัศมีคายเดียวกันค่าแรงจับยึดชิ้นงานที่ต่างกันพบว่ากราฟมีความชันที่แตกต่างกันที่ค่าแรงจับยึดชิ้นงานน้อยความชันของกราฟจะน้อย และแรงจับยึดชิ้นงานมากความชันของกราฟจะมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าแรงจับยึดชิ้นงานมีผลต่อความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงระยะทางมาก

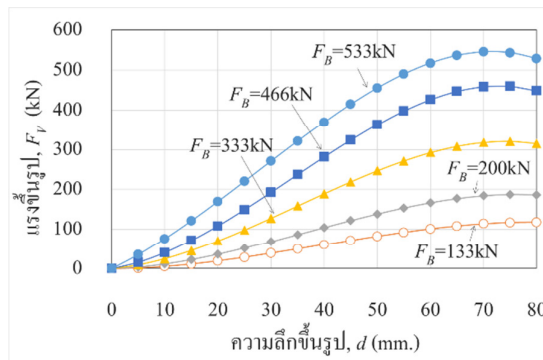


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงขึ้นรูปและความลึกขึ้นรูป



(ก) $R_d = 3\text{ mm}$.

(ข) $R_d = 6\text{ mm}$.



(ค) $R_d = 8\text{ mm}$.

รูปที่ 6 ผลตอบสนองของแรงขึ้นรูปที่รัศมีคาย 3, 6 และ 8 มม.

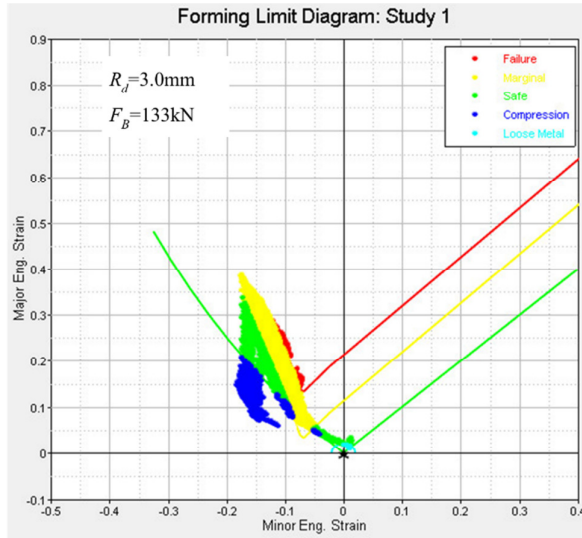
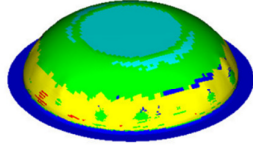
3.2 ผลกระทบของแรงจับยึดและรัศมีมุมคายต่อขีดจำกัดการขึ้นรูป

รูปที่ 7-9 แสดงผลการจำลองขีดความสามารถการขึ้นรูปและเปรียบเทียบผลการทดลองการขึ้นรูป กระดาษอลูมิเนียมที่รัศมีคาย 3.0 มม. 6.0 มม. และ 8.0 มม. พบว่าที่แรงจับยึดขึ้นงาน 133 kN รัศมีคาย 3.0 มม. ขึ้นงานที่ได้จากการทดลองมีความสมบูรณ์ ไม่เกิดรอยร่น มีความสอดคล้องกับขึ้นงานที่ได้จากการจำลอง โดยบริเวณปีกขึ้นงานมีสีน้ำเงิน (compression zone) เป็นบริเวณ ที่มีการบีบอัดของเนื้อวัสดุใน ระหว่างการไหลของเนื้อวัสดุเข้าในช่องว่างของคายทำให้ขึ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น บริเวณด้านข้างเลยจากรัศมีคายขึ้นไปจะมีพื้นผิวสีเหลือง (marginal zone) เป็นบริเวณ มีความเสี่ยงที่จะเกิดการฉีกขาดหรือสูญเสียเนื้อวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากการไหลผ่านรัศมีคายระหว่างการขึ้นรูป พื้นผิวสีเขียว (safety zone) บริเวณผนังด้านข้างใกล้รัศมีพันซ์เป็นบริเวณผิวขึ้นงาน มีความสมบูรณ์ ในขณะที่รัศมีคาย $R_d=6,8\text{mm}$, $F_B=133$ kN พบว่าขึ้นงานที่ได้จากการทดลองมีเกิดรอยร่น เนื่องมาจากการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่เข้าไปยังคายมีความเร็วมากทำให้ขึ้นงานที่ได้จากการทดสอบเกิดรอยร่น มีความสอดคล้องกับขึ้นงานที่ได้จากการจำลอง โดยบริเวณปีกขึ้นงานมีสีน้ำเงิน (compression zone) เป็นบริเวณ ที่มีการบีบอัดของเนื้อวัสดุใน ระหว่างการไหลของเนื้อวัสดุเข้าในช่องว่างของคายทำให้ขึ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น บริเวณด้านข้างเลยจากรัศมีคายขึ้นไปจะมีพื้นผิวสีเหลือง (marginal zone) เป็นบริเวณ มีความเสี่ยงที่จะเกิดการฉีกขาดหรือสูญเสียเนื้อวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากการไหลผ่านรัศมีคายระหว่างการขึ้นรูป พื้นผิวสีเขียว (safety zone) บริเวณผนังด้านข้างใกล้รัศมีพันซ์เป็นบริเวณผิวขึ้นงานมีความสมบูรณ์ เมื่อใช้แรงจับยึด $F_B=533$ kN พบว่าขึ้นงานที่ได้จากการทดลองมีรอยฉีกขาดบริเวณรัศมีคาย เนื่องมาจากแรงที่ใช้สำหรับจับยึดขึ้นงานมีมากเกินไป มีความสอดคล้องกับขึ้นงานที่ได้จากการจำลอง โดยบริเวณปีกขึ้นงานมีสีน้ำเงิน (compression zone) เป็นบริเวณ ที่มีการบีบอัดของเนื้อวัสดุใน ระหว่างการไหลของเนื้อวัสดุเข้าในช่องว่างของคายทำให้ขึ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น บริเวณด้านข้างเลยจากรัศมีคายขึ้นไปจะมีพื้นผิวสีเหลือง (marginal zone) เป็นบริเวณ มีความเสี่ยงที่จะเกิดการฉีกขาดหรือสูญเสียเนื้อวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากการไหลผ่านรัศมีคายระหว่างการขึ้นรูป ในกรณีของรัศมีคาย $R_d=8\text{mm}$. ที่แรงจับยึด $F_B=133-533$ kN ขึ้นงานจะเกิดรอยร่น เมื่อพิจารณาความเครียดในแนวแกนหลักและแกนรอง ค่าความเครียดในแนวแกนหลักสูงที่รัศมีคายมีค่าน้อยและจะลดลงเมื่อขนาดของรัศมีคายเพิ่มขึ้นบริเวณขอบด้านใน ใกล้ขอบขึ้นงาน ในขณะที่ความเครียดในแนวแกนรองมีค่าติดลบที่เกิดจากการร่นหรือการบีบอัดของเนื้อวัสดุมาก ที่ขนาดความโตของรัศมีคายมากอยู่บริเวณปีกของขึ้นงาน ดังนั้นสรุปได้ว่ารัศมีคายมีผลต่อการยึดตัวของความเครียดในแนวแกนหลักและความเครียดในแกนรอง ซึ่งจากขึ้นงานที่มีรูปทรงเป็นครึ่งวงกลมจะต้องมีการขึ้นรูปในลักษณะจึงดึงรวมด้วยจึงจะทำให้ขอบด้านข้างของขึ้นงานมีการยึดตัวที่ทำให้พื้นผิวเรียบ



FLD Plot
Zone Contour (Engineering Strain, Membrane)

- Failure
- Marginal
- Safe
- Compression
- Loose Metal
- No result

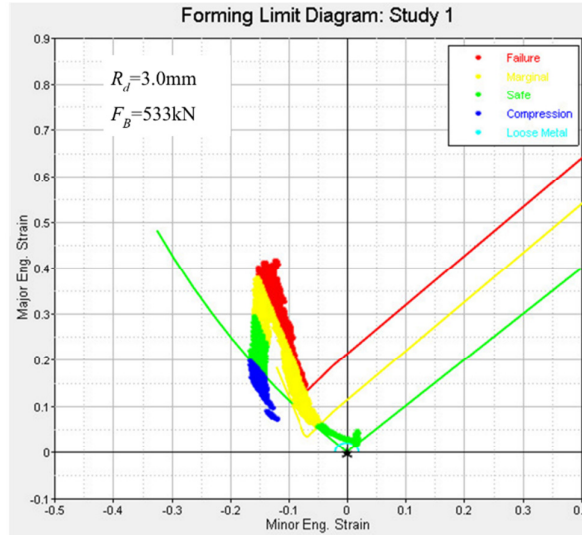
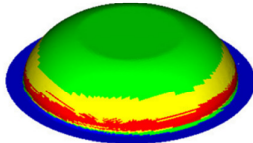


(ก) $F_B = 133\text{ kN}$



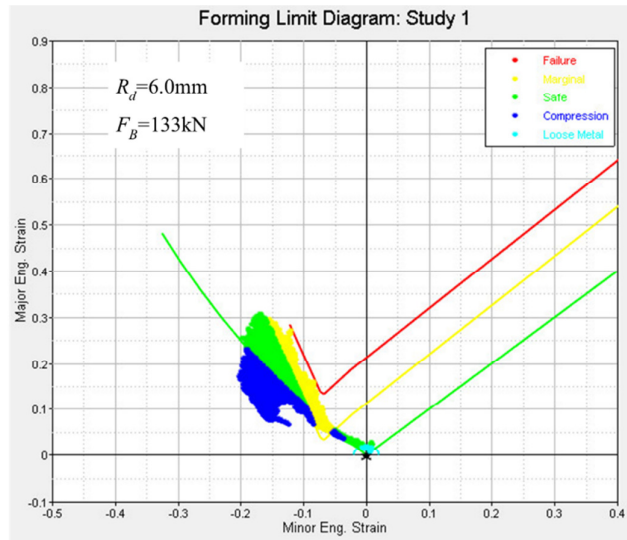
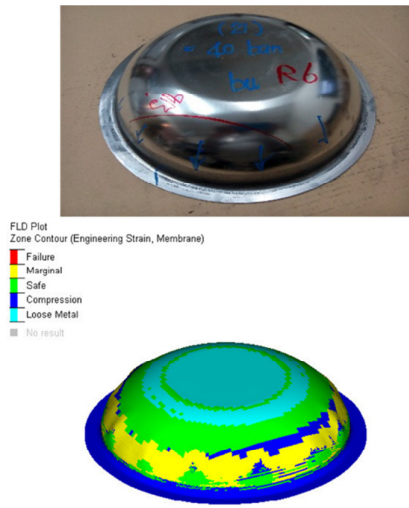
FLD Plot
Zone Contour (Engineering Strain, Membrane)

- Failure
- Marginal
- Safe
- Compression
- Loose Metal
- No result

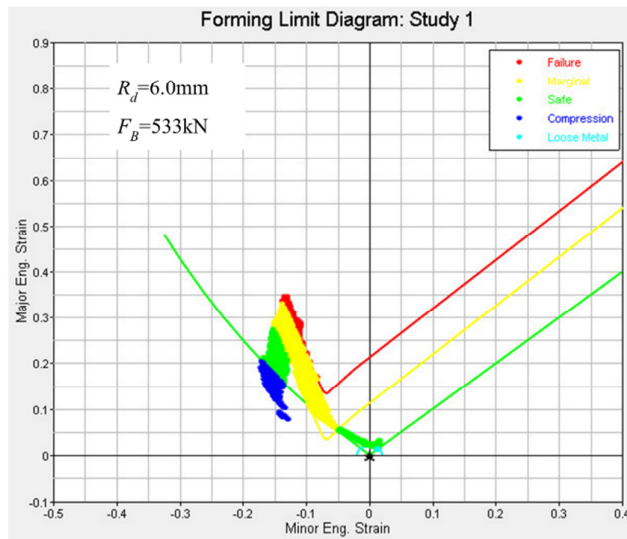
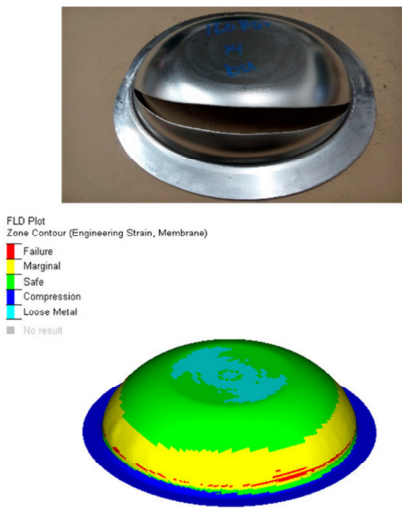


(ข) $F_B = 533\text{ kN}$

รูปที่ 7 ซีดจำกัดการขึ้นรูปของรัศมีมุมคาย $R_d=3\text{mm}$. ที่แรงจับยึด (ก) $F_B=133\text{ kN}$ (ข) $F_B=533\text{ kN}$

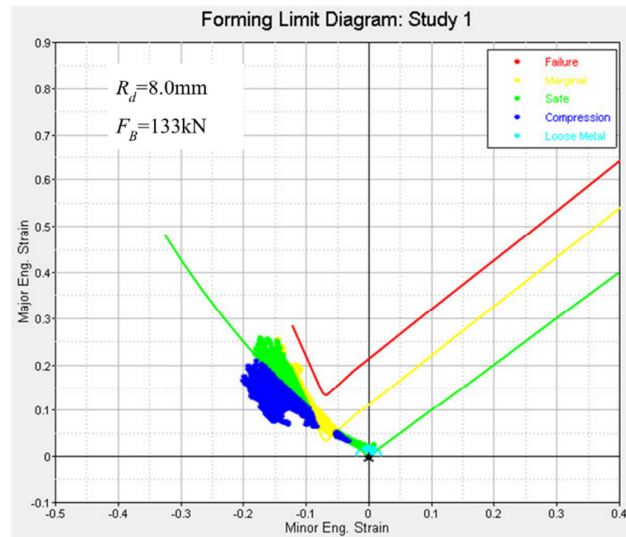
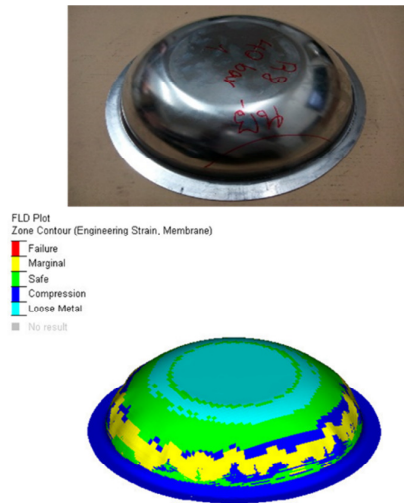


(ก) $F_B = 133 \text{ kN}$

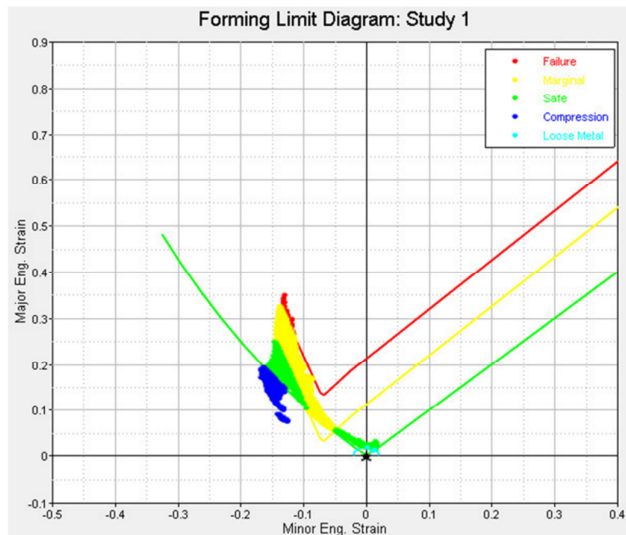
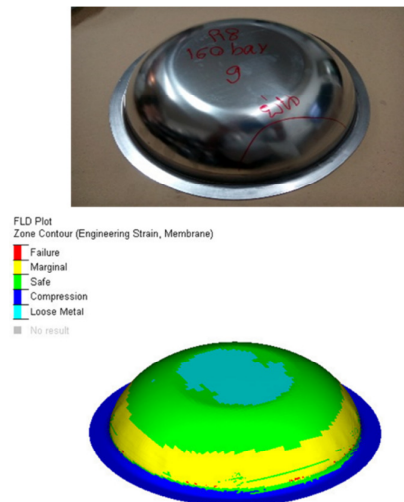


(ข) $F_B = 533 \text{ kN}$

รูปที่ 8 จิตจำกัการขึ้นรูปของรัศมีมุมคาย $R_d=6\text{มม.}$ ที่แรงจับยึด (ก) $F_B=133 \text{ kN}$ (ข) $F_B=533 \text{ kN}$



(ก) $F_B = 133 \text{ kN}$



(ข) $F_B = 533 \text{ kN}$

รูปที่ 9 ซีดจำกัดการขึ้นรูปของรัศมีมุมคาย $R_d=8\text{mm}$. ที่แรงจับยึด (ก) $F_B=133 \text{ kN}$ (ข) $F_B=533 \text{ kN}$

4.สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาแรงจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับการลากขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียม (A1100-H24) โดยใช้วัสดุแผ่นอลูมิเนียมที่ความหนา 2.2 มม. ด้วยการขึ้นรูปขึ้นตอนเดียว เพื่อแก้ปัญหาการการแตกและย่นของชิ้นงาน จากการวิจัยศึกษาด้วยการทดลองและการจำลองการขึ้นรูป ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ผลการทดลองดังนี้

1. จากผลการทดลองและผลการจำลองการขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียม พบว่ารัศมีคาย 3 มม. และแรงจับยึดชิ้นงานที่ 133 kN ทำให้ชิ้นงานออกมาสมบูรณ์ ไม่มีรอยย่นและรอยแตกของชิ้นงาน มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

2. จากการดำเนินการวิจัยทำให้ทราบได้ว่าขนาดรัศมีคายมีอิทธิพลต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุ รัศมีคายที่มีขนาดเล็กทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุเข้าสู่ช่องว่างระหว่างคายและพันธ์ได้ช้ากว่ารัศมีคายที่มีขนาดใหญ่ และแรงจับยึดชิ้นงานที่มีหน้าที่ช่วยควบคุมการไหลของเนื้อวัสดุ ไม่ให้เกิดการย่นหรือฉีกขาดในระหว่างการขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียม

3. ผลจากการจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียมพบว่ามีความสอดคล้องกับชิ้นงานจริง ส่งผลให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่ายของวัสดุในการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกระทะอลูมิเนียมได้

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทไทยสแตนเลสสตีลจำกัด ที่ได้สนับสนุนการดำเนินการวิจัย เพื่อเครื่องจักรและแผ่นวัสดุ สำหรับการขึ้นรูปจริงและข้อมูลต่าง ๆ จนประสบผลสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sawad Sodamuk, Vichit Buakeaw, Suparerak Sirivedin, et al., "Formability Prediction of Automotive Parts Using Forming Limit Diagrams," The 2th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 18-20 October 2006, Nakhon Ratchasima.
- [2] T. Ohata, Y. Nakamura, T. Katayama, et al., "Development of optimum process design system by numerical simulation, Journal of Materials Processing Technology," Vol.60, 1996, pp.543-548.
- [3] GAO En-zhi, LI Hong-wei, KOU Hong-chao, et al., "Influence of material parameters on deep drawing of thin-walled hemispheric surface part," Trans. Nonferrous Metals Society China, Vol.12, 2009, pp.433-437.
- [4] วารุณี เปรมานนท์, อรจิรา เต๋ียววณิชย์ "วัสดุทำแม่พิมพ์และชิ้นงาน" (ISBN: 9789744434395).
- [5] เสกสรร ไชยจิตต์, ประเสริฐ ปราชญ์ประยูร, กรวิศว์ พลราชม "การวิเคราะห์เพื่อลดกระบวนการขึ้นรูปลึงกดอาหารที่เหลี่ยมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25 , 19-21 ตุลาคม 2553 จ.กระบี่.
- [6] ไมตรี กมลรัตนพิสุทธิ์ , สุรังสี เฉลจเจริญ "การวิเคราะห์เพื่อลดกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์"การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 , 17 - 19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี.
- [7] R.Hill, "A theory of the yielding and plastic flow of anisotropy metals," Proceeding of Royal Society of London, 1948, pp.193-281.
- [8] Y.Q. Liu, J.C. Wang, P. Hu, "The numerical Analysis of anisotropic sheet in deep-drawing processes," Journal of Materials Processing Technology, Vol.120, 2002, pp.45-52.

- [9] A.Hrivnak, L. Sobotova, “The influence aging and conditions of stress on the properties of the deep drawing process,” Journal of Materials Processing Technology, Vol.34, 1992, pp.425-430.
- [10] ศิริชัย ต่อสกุล , อนุชา วัฒนาภา “พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ” (ISBN:978-616-08-0203-6) หน้า 169 – 170.
- [11] สุรวุฒิ ยะนิต “การศึกษากการเกิดรอยดึงของกระบวนการขึ้นรูปลึกของถ้วยทรงกระบอกกลม” การประชุมคุรุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติครั้งที่ 7, 2014.
- [12] Sansot PANICH, Vitoon UTHAISANGSUK, Jittichai JUNTARATIN and Surasak SURANUNTCHAI “Determination of Forming Limit Stress Diagram for Formability Prediction of SPCE 270 Steel Sheet,” Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol.21, No.1, 2011, pp.19-27,
- [13] K. Drotleff, S. Panich, M. Liewald, and V. Uthaisangsuk, “Experimental and Numerical Formability Analysis of Advanced High Strength Steel for Deep Drawing using the Nonlinear Strain Path Forming Limit,” In proceedings of the 9th forming technology forum: Advanced method in material testing for sheet metal forming. (FTF2016), ohlstadt/Garmisch-Partenkirchen, Germany,12-13 Sep. 2016.
- [14] Hyperwork User’s Manual, Version 11.0, Altair Engineering, Inc., Troy, MI 45084, 2012.