



การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงโลหะแผ่น คมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์* และวัชรินทร์ เขียวไกร²

Application of Finite Element Methods for Deep Drawing Process of Metal Sheet

Komsan Wongkalasin^{1*} and Vatcharin Keowkrai²

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอศรีสงคราม จังหวัดนครพนม 48150

²สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000

¹Sri Songkhram Industrial Technology College, Nakhon Phanom University, Sri Songkhram District, Nakhon Phanom, 48000

²Program in Agricultural Machinery, Faculty Agriculture and Technology, Nakhon Phanom University, Sri Songkhram District, Nakhon Phanom, 48000

* Corresponding author. E-mail address: komsan@npu.ac.th

Received: 3 July 2017; Accepted: 6 September 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงโลหะแผ่นเพื่อช่วยลดขั้นตอนในการผลิตลดการลองผิดลองถูกของกระบวนการ โดยนำผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดไปออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการและทำการทดสอบขึ้นรูปจริงแล้วนำมาเปรียบเทียบผล วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นเหล็กแผ่น SPCC JIS G 3141 ชั้นงานต้นแบบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 71 mm สูง 19 mm และมีความหนา 0.5 mm จากการวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสมเท่ากับ 95 mm รัศมีตาย 3 mm และแรงในการจับยึดชิ้นงาน 6 kN ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปชิ้นงานนี้ จากข้อมูลที่ได้นำไปออกแบบชุดแม่พิมพ์และทำการทดสอบขึ้นรูปจริง ผลที่ได้ชิ้นงานมีลักษณะตรงกับชิ้นงานที่ได้จากการจำลองและชิ้นงานต้นแบบ การเกิดรอยย่นจะเกิดที่ตำแหน่งบริเวณที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจะเห็นว่าการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงสามารถช่วยในการออกแบบชุดแม่พิมพ์ การหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าและการหาแรงในการจับยึดชิ้นงานได้ เป็นการช่วยลดเวลาในการลองผิดลองถูกและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงาน

คำสำคัญ: การขึ้นรูปโลหะแผ่น กระบวนการดึงขึ้นรูปลึง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research is an application of finite element methods for deep drawing process to assist in reducing the steps in the process. The mold was designed from a simulation and analysis of the deep drawing process. The material, JIC G 3141 SPCC, was used for molding. The prototype model's was 71, 19, 0.5 mm. in diameter, height and thickness respectively. An analysis of finite element method resulted in a suitable diameter of 95 mm. for the blank sheet, while the die radius was 3 mm. and the blank holder force was 6 kN. The mold was designed, and the real model was formed. A comparison of the results from the real model and simulation model showed that they were the same shape with some differences in the locations of tears and wrinkles. The findings indicated that applying finite element method of the deep drawing process had aided in designing the mold, as well as in calculating the diameter of the blank sheet and blank holder force which had reduced time and costs.

Keywords: Sheet metal forming, Deep drawing process, Finite element method

บทนำ

วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็กลงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาที่ยั่งยืนและเป็นกลไกหลัก

ในการฟื้นฟูและเสริมสร้างความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจ โดยวิสาหกิจเหล่านี้ส่วนหนึ่งเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อนำไปเป็นส่วนประกอบสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับตกแต่งบ้าน

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือเครื่องจักรกลทางการเกษตร เป็นต้น โดยชิ้นส่วนที่ผลิตส่วนใหญ่มาจากระบวนการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing process) จากโลหะแผ่น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความถูกต้องตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด จากการศึกษาพบว่าข้อบกพร่องที่ได้จากการดึงขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ รูปร่างและขนาดไม่ตรงตามต้องการ ข้อบกพร่องบนชิ้นงานรวมทั้งบนผิวชิ้นงาน และคุณสมบัติไม่ตรงกับความต้องการ

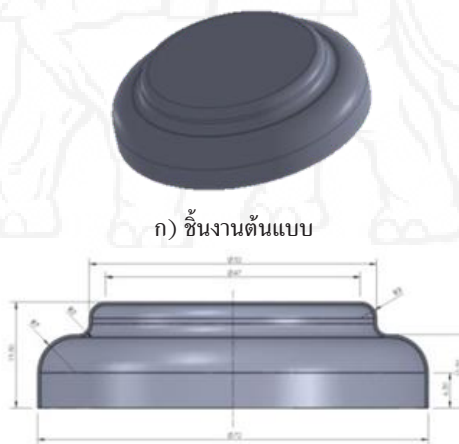
การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปลึกทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการและกำหนดขนาดของแม่พิมพ์ซึ่งผลที่ได้จะใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแผ่นโลหะและบริเวณที่จะเกิดความเสียหายกับชิ้นงานในกระบวนการ และจากผลการจำลองนำไปปรับใช้ในกระบวนการและการกำหนดขนาดของแม่พิมพ์ เป็นการช่วยลดต้นทุนและเวลาในการผลิตได้

(Batti, Patil, & Rajesh, 2015) ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์กระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่นที่ใช้ในการวิเคราะห์และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปจริงเพื่อนำไปสู่การพัฒนาและเป็นแนวทางสำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปของโลหะแผ่นในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมต่อไป

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. สร้างชิ้นงานต้นแบบ

ชิ้นงานต้นแบบมีลักษณะเป็นฝาครอบ 2 ชั้น วัสดุเป็นเหล็ก SPCC JIS G 3141 (Torsakul & Buntaopis, 2013) เป็นเหล็กที่ใช้สำหรับการขึ้นรูป ชิ้นงานต้นแบบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 71 mm สูง 19 mm และมีความหนา 0.5 mm การสร้างชิ้นงานต้นแบบจะให้อยู่ในรูปของ Solid CAD Data ดังแสดงรูปที่ 1



ก) ชิ้นงานต้นแบบ

ข) รายละเอียดของขนาด

รูปที่ 1 ชิ้นงานต้นแบบ Solid CAD Data และรายละเอียดของขนาดชิ้นงาน

2. กำหนดรายละเอียดของแม่พิมพ์

รายละเอียดของแม่พิมพ์ที่ต้องกำหนดประกอบไปด้วย รัศมีตายและช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ตาม

ตารางที่ 1 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (Oehler & Kaiser, 1973)

$$R_D = 0.035[50 + (d_0 - d_1)]\sqrt{T} \quad (1)$$

$$CL = T + 0.07\sqrt{10T} \quad (2)$$



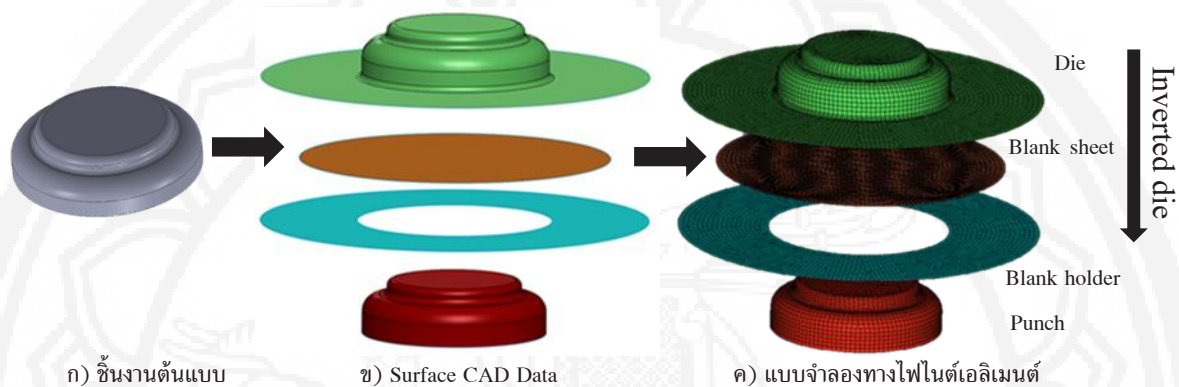
ตารางที่ 1 รายละเอียดแม่พิมพ์

ขนาดของแม่พิมพ์	ขนาด
รัศมีตาย (R_D)	2.5 - 5 mm
ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (CL)	0.66 mm

3. สร้างแบบจำลองและกำหนดเอลิเมนต์

จากชิ้นงานต้นแบบ Solid CAD Data สร้างเป็น Surface CAD Data ของชุดแม่พิมพ์ (Premanond & Kaewtatip, 2009) ประกอบไปด้วย พันช์ (Punch) ดาย (Die) แผ่นชิ้นงานเปล่า (Blank sheet) และแผ่นจับยึด

ชิ้นงาน (Blank holder) กำหนดรัศมีตายและระยะช่องว่างแม่พิมพ์ ตามตารางที่ 1 การจัดตำแหน่งชิ้นงานและแม่พิมพ์ต้องให้สอดคล้องการทำงานของเครื่องปั๊มซึ่งแบบกลับทาง (Inverted die) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Surface CAD Data สร้างเป็นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแม่พิมพ์

กำหนดเอลิเมนต์แม่พิมพ์ ต้องสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด บริเวณที่เป็นส่วนเว้าส่วนโค้งแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กจะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงรูปร่างแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ การกำหนดจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจะทำให้ใช้เวลานานในการคำนวณและอาจทำให้ไม่สามารถแสดงผลเฉลย (Dechaumphai, 2007)

กำหนดเอลิเมนต์ของแผ่นชิ้นงานเปล่า จะกำหนดด้วยโครงสร้างแบบเปลือก (Shell element) ชนิด Belyschko-Tsay ซึ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม มีจำนวน 5 จุดอินทิเกรตตามแนวความหนาและไม่คำนึงถึงผลจากการสปริงตัวกลับ (Spring back) ของแผ่นชิ้นงานเปล่า และกำหนดให้มีการเปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์ตามการเสียรูป (Adaptive meshing) การ

เปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์จะปรับเปลี่ยนได้ 3 ระดับ และกำหนดให้เป็นวัสดุที่เปลี่ยนรูปได้ (Deformable body) (Hariharan & Balaji, 2009)

4. กำหนดคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุ

ชุดแม่พิมพ์ (Hariharan & Balaji, 2009) กำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body) แผ่นชิ้นงานเปลื่อกำหนดคุณสมบัติวัสดุเป็น Anisotropic Elastic Plastic ฟังก์ชันการครากใช้ทฤษฎีแอนไอโซโทรปิก ของ Hill (1950) และพฤติกรรมของวัสดุ Hardening Curve กำหนดค่าความเค้นและความเครียดเป็นไปตามสมการ Power law (สมการที่ 3) (Hosford & Caddell, 1993) และมีคุณสมบัติเชิงกลตามตารางที่ 2
$$\sigma = k(\varepsilon)^n \quad (3)$$

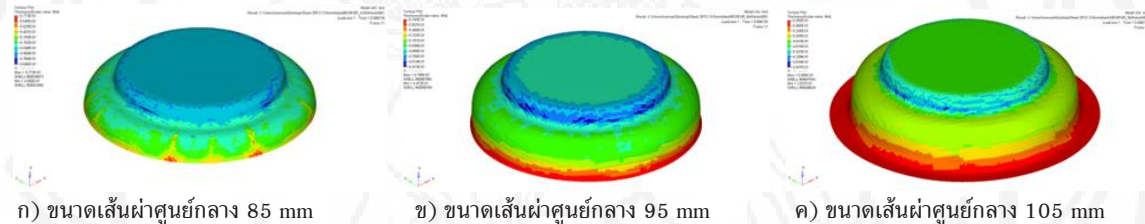
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติเชิงกล	SPCC JIS G 3141
Modulus Young (E) (Gpa.)	210
Yield Stress (YS) (Mpa.)	145
Poisson's Ratio	0.3
Hardening Exponent (n)	0.21
Hardening Coefficient (k) (GPa.)	489
Anisotropy Coefficients(r_0, r_{45}, r_{90})	1.017, 0.981, 1.084
Normal Anisotropy	1.0

ผลการจำลองและการวิเคราะห์

1. การหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม เริ่มต้นใช้ขนาดเท่ากับขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่ใช้จริงโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 85 mm

แล้วเพิ่มขนาดเป็น 95 mm และ 105 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 จากรูปเป็นค่าความหนาที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานโดยพิจารณาจากแถบสี แถบสีแดงเป็นความหนาที่เพิ่มขึ้นส่วนสีน้ำเงินเป็นขนาดความหนาที่ลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดที่เหมาะสมเท่ากับ 95 mm โดยที่ผิวของชิ้นงานที่ต้องการมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

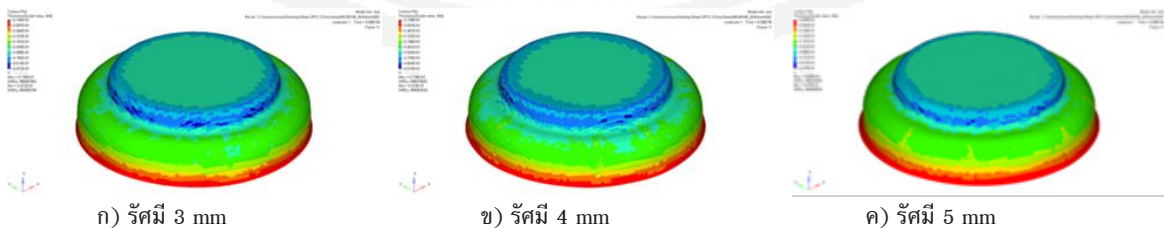


รูปที่ 3 การวิเคราะห์ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า

2. การวิเคราะห์รัศมีด้ายที่เหมาะสม จากขนาดที่เหมาะสมของแผ่นชิ้นงานเปล่านำมาหาขนาดของรัศมีด้ายที่เหมาะสม กำหนดแรงจับยึด 6 kN ซึ่งได้จากการคำนวณตามสมการที่ 4 (Kurt, 1985) กำหนดรัศมีด้ายเท่ากับ 3 mm 4 mm และ 5 mm จาก

ในตารางที่ 1 พิจารณาผลของค่าความหนาที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานโดยพิจารณาจากแถบสีโดย ดังรูปที่ 4 จากรูปจะเห็นว่าเพิ่มขนาดของรัศมีด้ายผิวของชิ้นงานบริเวณที่ต้องการมีความหนาเพิ่มซึ่งหมายถึงโอกาสที่จะเกิดรอยยับได้ ดังนั้นรัศมีที่เหมาะสมจึงมีค่าเท่ากับ 3 mm

$$P_{BH} = 10^{-3} C \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005 d_0}{T} \right] \sigma_u \quad (4)$$



รูปที่ 4 การวิเคราะห์หาขนาดรัศมีด้าย



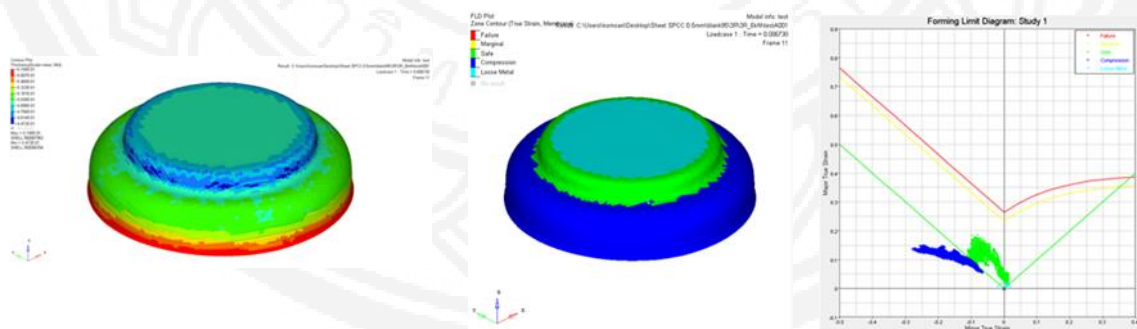
3. การขนาดของแรงจับยึดชิ้นงาน

เมื่อได้ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าและรัศมีตายที่เหมาะสมแล้วนำไปหาขนาดของแรงจับยึดของชิ้นงาน โดยกำหนดขนาดของแรงจับยึดเริ่มต้นจากการคำนวณตามสมการที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6 kN และเพื่อให้ได้แรงจับยึดที่เหมาะสมที่สุดทำการเพิ่มลดแรงเป็น 4kN 5 kN 7kN และ 8 kN ซึ่งการวิเคราะห์จะพิจารณาอยู่ 3 ส่วน คือ ความหนาที่เปลี่ยนไป โซนขีดจำกัดการขึ้นรูป และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD) (Keeler, 1961; Goodwin, 1968) โดยลักษณะผิวและความหนาที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 3 และเมื่อพิจารณาพบว่าแรงจับยึดชิ้นงานขนาดเท่ากับ 6 kN มีความเหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นได้ว่ารูป ก) ความหนาของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาบริเวณสี่เหลี่ยมมีความหนา 0.504 mm บริเวณสี่เหลี่ยมมีความ

หนา 0.447 mm และบริเวณสี่เหลี่ยมมีความหนา 0.575 mm ซึ่งเกิดขึ้นที่ขอบของชิ้นงานและเป็นบริเวณที่ไม่ต้องการ รูป ข) บริเวณสี่เหลี่ยมแสดงถึงบริเวณที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ บริเวณสี่เหลี่ยมแสดงถึงบริเวณที่มีความปลอดภัยในการขึ้นรูป และบริเวณสี่เหลี่ยมแสดงถึงบริเวณที่เกิดความเค้นอัดของชิ้นงานซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นได้ รูป ค) แสดงค่าความเค้นและความเครียดของเอลิเมนต์ โดยจุดที่เป็นสี่เหลี่ยมจะอยู่ระหว่างเส้นสี่เหลี่ยมและเหลี่ยมหมายถึงมีความปลอดภัยในการขึ้นรูป จุดที่เป็นสี่เหลี่ยมจะอยู่ใต้เส้นสี่เหลี่ยมหมายถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจุดที่เป็นสี่เหลี่ยมจะอยู่ใต้เส้นสี่เหลี่ยมหมายถึงโอกาสที่จะเกิดรอยย่น เมื่อพิจารณาทั้ง 3 ส่วนแสดงให้เห็นว่าผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่น

ตารางที่ 3 ผลเฉลยที่ได้ตามเงื่อนไข

แรงจับยึด	ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์
4 kN	ผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่น หนาสูงสุด 0.5753 mm และหนาท่ำสุด 0.4408 mm
5 kN	ผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่น หนาสูงสุด 0.5760 mm และหนาท่ำสุด 0.4421 mm
6* kN	ผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่น หนาสูงสุด 0.5754 mm และหนาท่ำสุด 0.4412 mm
7 kN	ผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่น หนาสูงสุด 0.5753 mm และหนาท่ำสุด 0.4403 mm
8 kN	ผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่น หนาสูงสุด 0.5755 mm และหนาท่ำสุด 0.4410 mm



ก) ค่าความหนาที่เปลี่ยนไป ข) โซนขีดจำกัดการขึ้นรูป ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
รูปที่ 5 ค่าความหนาที่เปลี่ยนไป โซนขีดจำกัดการขึ้นรูปและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLD)

4. การเปรียบเทียบผลกับการทดสอบขึ้นรูปจริง

นำผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์รัศมีตาย ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่านำมาออกแบบชุดแม่พิมพ์เพื่อติดตั้งเข้ากับเครื่องปั๊มดังรูปที่ 6 เพื่อทำการ

ขึ้นรูป ชิ้นงาน จากรูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์และชิ้นงานจริง ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานทั้งสองมีลักษณะที่ตรงกันและผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่น



รูปที่ 6 เครื่องปั๊มที่ติดตั้งชุดแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 7 ผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์และการขึ้นรูปจริง

อภิปรายผลการศึกษา

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงโลหะแผ่นที่ความหนา 0.5 mm การทำงานแม่พิมพ์เป็นแบบกลับทาง โปรแกรมในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์และจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูปโดยเฉพาะ เครื่องปั๊มที่ใช้ในการทดสอบขนาด 10 ตัน ได้ผลดังนี้

1. การหาขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าและการกำหนดรัศมีตาย

ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า เริ่มต้นจากคลี่ชิ้นงานต้นแบบออกจะได้เป็นแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 mm แล้วกำหนดเพิ่มขนาดเป็น 95 mm และ 105 mm ตามลำดับ กำหนดรัศมีตายเท่ากับ 3 mm ผลจากการจำลองจะได้ว่าขนาดที่เหมาะสมเท่ากับ 95 mm ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้วัสดุน้อยที่สุดโดยได้ชิ้นงานตามที่ต้องการขนาดรัศมีตาย นำขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสมนำมาจำลองการขึ้นรูปโดยกำหนดรัศมีตายเริ่ม 3 mm แล้วเพิ่มเป็น 4 mm และ 5 mm ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มรัศมีตายชิ้นงานมีโอกาสที่จะเกิดรอยย่นที่ผิวของชิ้นงานมากขึ้นดังนั้นรัศมีตายที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 3 mm

2. การหาขนาดแรงจับยึดชิ้นงาน

จากขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าและรัศมีตายที่เหมาะสมนำมาหาแรงในการจับยึดชิ้นงาน ปรับเพิ่มลดแรงในการจับยึดโดยกำหนดแรงเป็น 4 kN 5 kN 6 kN 7 kN และ 8 kN เมื่อพิจารณาผลจากการจำลองแรงในการจับยึดที่ 6 kN จะไม่เกิดรอยย่นบริเวณผิวที่ต้องการ

3. การเปรียบเทียบผล

ออกแบบชุดแม่พิมพ์เพื่อทำการทดสอบขึ้นรูปจริง โดยให้รัศมีตายเท่ากับ 3 mm ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าเท่ากับ 95 mm และแรงในการจับยึดค่าเท่ากับ 6 kN นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ชิ้นงานทั้งสองมีลักษณะที่ตรงกัน ผิวชิ้นงานที่ต้องการไม่มีรอยย่น ในส่วนการเกิดรอยย่นจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของชิ้นงานซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการ

การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ทราบถึงผลของชิ้นงานและความเสียหายที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขของกระบวนการที่กำหนดไว้ นำเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ชิ้นงานตรงกับชิ้นงานต้นแบบ โดยได้ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า 95 mm รัศมีตาย 3 mm และแรงในการจับยึดชิ้นงาน 6 kN และเมื่อทำการขึ้นรูปจริงชิ้นงานที่ได้มีลักษณะตรงกับชิ้นงานที่ได้จากการจำลองและชิ้นงานต้นแบบ จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาเงื่อนไขของกระบวนการ ขนาดของ



แม่พิมพ์ที่เหมาะสมและยังสามารถทำนายความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Batti et al. (2015) ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการจำลองการขึ้นรูปเพื่อทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานและหาเงื่อนไขของกระบวนการขึ้นรูปที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงโลหะแผ่นสามารถหาเงื่อนไขในการขึ้นรูปและทำนายความเสียหายให้กับชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง โดยเริ่มจากพิจารณาชิ้นงานต้นแบบว่าเหมาะสมกับกระบวนการหรือไม่ สร้างชิ้นงานในรูป Solid Data เพื่อให้ง่ายต่อการสร้าง Surface CAD Data ที่ประกอบด้วย พินช์ ดาย แผ่นชิ้นงานเปล่าและแผ่นจับยึดชิ้นงาน จากนั้นจำลองการขึ้นรูปเพื่อหาระยะมีตาย ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าและแรงจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมซึ่งกระบวนการนี้สามารถดำเนินการไปพร้อมกัน จากผลการเปรียบเทียบได้ลักษณะของชิ้นงานที่ตรงกัน ผิวชิ้นงานที่ต้องการไม่มีรอยย่น ดังนั้นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถช่วยลดขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ของกระบวนการ ช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น และยังสามารถทำนายตำแหน่งความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2558 ร่วมกับมหาวิทยาลัยนครพนม

เอกสารอ้างอิง

Batti, S. K., Patil, D. C., & Rajesh, D. G. (2015). Finite element simulation of sheet metal deep drawing using explicit code and result validation. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(6), 1080-1086.

Dechaumphai, P. (2007). *Finite element for engineering*. Bangkok: Chulalongkorn University Press.

Goodwin, G. M. (1968). Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *Society of Automotive Engineers*, 680093, 380-387.

Hariharan, K., & Balaji, C. (2009). Material optimization: A case study using sheet metal-forming analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 324-331.

Hill, R. (1950). *The mathematical theory of plasticity*. Oxford, London: The Clarendon Press.

Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (1993). *Metal forming: Mechanics and metallurgy* (2nd ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Torsakul, S., & Buntaopis, K. (2013). Effect of liquid pressure on drawing force in the hydrodynamic deep drawing to SPCC cold rolled carbon steel. *The Journal of KMUTNB.*, 23(3), 618-629.

Keeler, S. P. (1961). *Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches* (Doctoral dissertation). Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA: Cambridge MIT Press.

Kurt, L. (1985). *Handbook of Metal Forming*. Dearborn, MI: McGraw-Hill.

Oehler, G., & Kaiser, F. (1973). *Blanking Punching and Drawing Tool* (6th ed.). Berlin, Heidenberg, New York: Springer-Verlag.

Premanond, V., & Kaewtatip, P. (2009). *Die design for deep drawing: Metal sheet forming*. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan) Press.