

อิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น
The Influence of Reverse Pressure on The Compression and Deformation
of Workpieces in the Sheet Metal Extrusion Process

ธีระพล บุญธรรม^{1*} และ บพิท บุบผโชติ²
Theeraphon Boontham^{1*} and Bopit Bubphachot²

^{*1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีและวิศวกรรมเครื่องกล หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

^{*1,2}Master's degree, Department of Mechanical Engineering Postharvest Technology and Machinery Research Unit Metal
Technology Research Unit, Faculty of Engineering Maha-sarakham University Kantharawichai Maha Sarakham 44150

Received : 2023-10-27 Revised : 2024-02-29 Accepted : 2024-03-01

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น 2) เพื่อประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยวิเคราะห์ในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ด้วยกระบวนการไฟน์แบล็กแรงดันกลับจะมีผลกระทบโดยปรากฏชัดเจนที่มีต่อความเค้นในชิ้นงาน เนื้อวัสดุบริเวณขอบรัศมีของคมตัดจะถูกดันเลื่อนแหวกออกจากกัน ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของความเค้นไฮโดรสแตติกของเนื้อวัสดุงานในแนวแถบการเฉือน มีค่าการกระจายตัวสูง และเคลื่อนไหลตัวเข้าสู่แผ่นงานได้ง่ายขึ้น เมื่อกำหนดแรงดัน 20 kN พบว่า ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบตัวส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นกับวัสดุงานเพิ่มมากขึ้น และเมื่อกำหนดแรงดัน 60 kN พบว่า ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบตัวส่วนท้ายการอัดเกิดขึ้นกับวัสดุงานเพียงเล็กน้อย เพราะว่า แรงต้านของแรงดันสัมผัสกับเนื้อวัสดุมากขึ้น ซึ่งจะทำให้การสร้างความเค้นอัดบริเวณรอบหลุมอัดลดลง และเกิดตายโรล หลักการ และการใช้วัสดุในการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผลการทดลอง และการจำลองให้ผลในทิศทางเดียวกัน และแม่นยำตรงกับความเป็นจริง

คำสำคัญ : ขึ้นรูป, การยุบตัว, แรงดันกลับ

*ธีระพล บุญธรรม

E-mail address: theeraponb15@gmail.com

Abstract

The objectives of this research are 1) to study the influence of back pressure on workpiece quality in the sheet metal extrusion process. 2) To apply the finite element method in the analysis of the sheet metal forming process. The results indicate that the influence of back pressure on workpiece collapse in the sheet metal extrusion process, to the stress in the workpiece material at the radius edge of the cutting edge will be separated. The affect to the diffusion of hydrostatic stress of material in the shear strip area has dispersion value and spread into the worksheets easly. When setting 20 kN, it was found that the hole appear at the end of the rounded compression that cause of more materials, When the pressure was set at 60 kN, it was found that little bit appear at the end of the compression because the resistance of the pressure the material is greater. Which will cause the creation of compressive stress around the compression hole to decrease and cause die rolls to occur. The principle and material use of sheet metal extrusion process simulation by finite element method was found that the results of experimental and simulation are the same, accuratery corresponds to reality.

Keywords : Forming, Deformation, Reverse pressure

1. บทนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากโลหะแผ่นได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพ มีความเที่ยงตรงตามแบบที่ต้องการ และต้องการปริมาณชิ้นงานในการผลิตมากขึ้น จึงมีการใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเข้ามาช่วยในการผลิต เนื่องจากการบำรุงรักษาง่าย ใช้เวลาในการติดตั้งถอดประกอบน้อยต้นทุนต่ำ ชิ้นรูปขึ้นงานได้ในการผลิตสูง และมีคุณภาพสูงชิ้น สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการผลิตชิ้นส่วนจากโลหะ [1,4,14] การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โลหะแผ่นบางลักษณะสามารถสร้างผิวชิ้นงานให้สูงขึ้นเฉพาะบางส่วนได้ในขั้นตอนเดียว สำหรับการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง และน้ำหนักเบา โดยอาศัยกระบวนการทางแม่พิมพ์ที่ออกแบบให้พื้นสัมผัสขนาดโตกว่าตายในลักษณะ (Negative Clearance) [15] เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมตามสมบัติทางกลตามต้องการ สมบัติของโลหะที่ปราศจากข้อบกพร่อง และได้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นส่วนยานยนต์ โดยมีหลักการพื้นฐานของกระบวนการ คือ พื้นหน้าตัดของแท่งโลหะจะถูกกด หรือ ถูกเปลี่ยนโดยใช้แรงกดให้แท่งโลหะไหลผ่านแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแน่นอน กระบวนการอัดขึ้นรูปสามารถทำได้ที่อุณหภูมิปกติของวัสดุ คือ การดันขึ้นรูปเย็น (Cold extrusion) หรือ ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Hot extrusion) ตามสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูป โลหะส่วนใหญ่สามารถอัดขึ้นรูปได้หลายวิธี ตามความเหมาะสม ซึ่งโลหะทั่วไปที่สามารถดันขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิปกติ คือ ตะกั่ว อลูมิเนียม และทองแดง การอัดขึ้นรูปในสภาพเย็นของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Cold extrusion of non – ferrous) ทำให้โลหะเปลี่ยนรูปร่างน้อยกว่าโลหะกลุ่มเหล็ก [6,13] ซึ่งมีลักษณะคล้ายกระบวนการกดดันไหลขึ้นรูป (Bulk extrusion process) สำหรับโลหะก่อน ดังนั้นจึงเรียกกระบวนการกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal extrusion) [16,17] โดยกระบวนการผลิตขึ้นงานโดยทำให้เกิดการยึดตัวของวัสดุออกอย่างต่อเนื่อง โดยพิจารณาความลึกเป็นระยะ ๆ การเสียรูปถาวรที่เกิดขึ้นจากสภาวะความเค้นบนผิวโลหะ ที่เกิดการกลีบ

ของสปริงและเกิดความเสียหายจากการล้าของชิ้นงาน [2] การวิเคราะห์การไหลตัวของวัสดุในกระบวนการตัดละเอียดผล การจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับการทดลอง [13] การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะได้มีนักวิจัย และเสนอบทความที่สามารถยืนยันความแม่นยำตรงของการจำลองกระบวนการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับ การทดลองจริงมากมาย สำหรับการศึกษาค้นคว้ากระบวนการเพื่อผลิตชิ้นส่วนโดยออกแบบรูปร่างเครื่องมือ และการประยุกต์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังเช่นในการวิเคราะห์หาแรงในการไฟน์เบลนจ์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พบว่าค่าแรงตัดจากการจำลองสูงกว่าการทดลองประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ [3,11] และการศึกษาผลกระทบของรัศมีเครื่องมือที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับกระบวนการไฟน์เบลนจ์ ที่มีการทดสอบผลความแม่นยำตรงของสมการตัวแทนสมบัติวัสดุจากการทดสอบการดึง [5] เป็นต้น ซึ่งโดยภาพรวมผลการศึกษาของบทความทางวิจัยส่วนใหญ่ให้ผลที่สอดคล้องกัน และเป็นการวิจัยที่ผสมผสานกันระหว่างกระบวนการไฟน์เบลนจ์ และการกดดันไหลขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยม และสะดวกต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ทำนาย ประมวลผล สามารถลดต้นทุนจากการลองผิดลองถูก (Trials and Errors) และยังสามารถวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมในการออกแบบอย่าง



รูปที่ 1 การยุบตัวขึ้นงานทดสอบแรงเสียดทานด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ใช้พื้นซ์เลื่อน

มีประสิทธิภาพสูงสุด (Optimum Process Design) พร้อมกันนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาเหตุผลย้อนหลัง (Backward Tracing Method) เช่นการทำนายลักษณะของชิ้นงานเริ่มต้น และ

ทำนายคุณสมบัติของวัสดุเริ่มต้นเพื่อให้ทราบถึงผลิตภัณฑ์ชิ้นงานที่อาจเกิดความเสียหาย เป็นการลดปริมาณของเสียที่อาจเกิดขึ้น เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาในการทดลอง การวิเคราะห์การไหลตัวของวัสดุในกระบวนการตัดละเอียดผลการจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับการทดลอง [11,13] การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะได้มีนักวิจัย และเสนอบทความที่สามารถยืนยันความแม่นยำของการจำลองกระบวนการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงมากมาย สำหรับการศึกษาพัฒนากระบวนการเพื่อผลิตชิ้นส่วนโดยออกแบบรูปร่างเครื่องมือ และการประยุกต์ในรูปแบบต่างๆ ดังเช่นการวิเคราะห์หาแรงในการไฟน์แบลنگก์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พบว่าค่าแรงตัดจากการจำลองสูงกว่าการทดลองประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ [3] และการศึกษาผลกระทบของรัศมีเครื่องมือที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับกระบวนการไฟน์แบลنگก์ ที่มีการทวนสอบผลความแม่นยำของสมการตัวแทนสมบัติวัสดุจากการทดสอบการดึง [5] เป็นต้น ซึ่งโดยภาพรวมผลการศึกษาของบทความทางวิจัยส่วนใหญ่ให้ผลที่สอดคล้องกัน และเป็นการวิจัยที่ผสมผสานกันระหว่างการกดดันไหลขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และกระบวนการไฟน์แบลنگก์ เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยม เพื่อให้ทราบถึงผลิตภัณฑ์ชิ้นงานที่อาจเกิดความเสียหาย เป็นการลดปริมาณของเสียที่อาจเกิดขึ้น เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาในการทดลอง และสะดวกต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ทำนาย ประมวลผล สามารถลดต้นทุนจากการลองผิดลองถูก (Trials and Errors) และยังสามารถวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมในการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (Optimum Process Design) พร้อมกันนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาเหตุผลย้อนหลัง (Backward Tracing Method) เช่นการทำนายลักษณะของชิ้นงานเริ่มต้น และทำนายคุณสมบัติของวัสดุเริ่มต้น เครื่องมือและอุปกรณ์ในการขึ้นรูปอย่างง่ายให้สามารถผลิตชิ้นงานที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วในการขึ้นรูปโลหะแผ่น กระบวนการใช้กับผลิตภัณฑ์เฉพาะ เช่น การบิน อวกาศ หรือชิ้นงานทดสอบ [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น เนื่องจากแรงดันกลับที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานได้

อีกทั้งโดยอาศัยการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการศึกษา อันนำไปสู่การเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันความแม่นยำในการวิเคราะห์ผล และข้อมูลจากการศึกษายังเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาอุตสาหกรรมอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

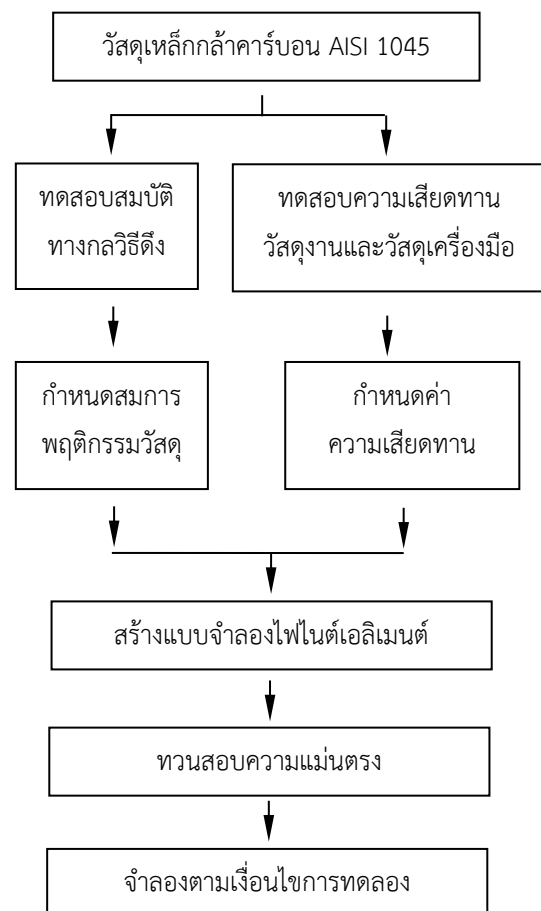
2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

2.2 เพื่อประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยวิเคราะห์ในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

3.วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปโลหะ การออกแบบการสร้างแม่พิมพ์ ในกระบวนการไฟน์แบลنگก์



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AISI 1045

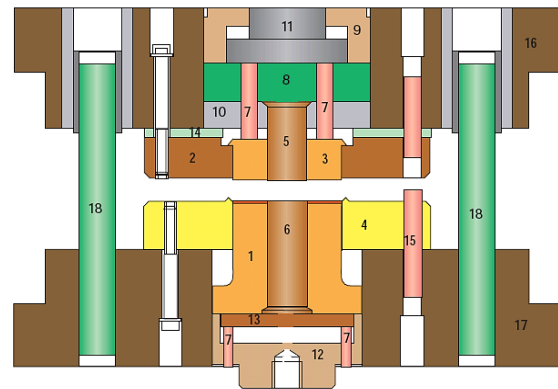
การกำหนดสมการพฤติกรรมของวัสดุเมื่อทำการทดสอบความต้านทานการดึง (Tension test) เป็นวิธีการทดสอบที่สะดวก รวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับการวิจัยด้านการขึ้นรูปโลหะ โดยพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงด้วยเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง และความเครียดจริง (True stress–True strain curve หรือ Effective stress–Effective strain curve) สามารถคำนวณได้มาจากผลการทดสอบการต้านแรงดึงของวัสดุ เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยแผนภูมิควบคุมจึงเลือกผลการทดสอบที่ให้ค่าการยืดตัวและแรงดึงสูงสุดที่อยู่ในช่วงควบคุม ใช้เป็นข้อมูลวิเคราะห์สมการแสดงพฤติกรรมของวัสดุสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2 ศึกษาการจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการไฟน์แบลลงค์

ตารางที่ 1 รายละเอียดของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์

รายการกำหนด	รายละเอียด
วัสดุชิ้นงานสำหรับทดลอง	เหล็กกล้าตามมาตรฐาน AISI 1045 ความหนา 5 mm
วัสดุแม่พิมพ์	เหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูงตามมาตรฐาน AISI M4
ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น (Blank size)	$\varnothing B = 50$ mm เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของพunch
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางพunch	$\varnothing p = 12.70$ mm
เส้นผ่านศูนย์กลางตาย	$\varnothing d = 10.00$ mm
รัศมีขอบคมตัดแม่พิมพ์	$R_p, R_d = 0.20$ mm
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	ยึดกับที่ (Fixed)
แรงดันพunch (Counter Punch)	20 kN, 40 kN และ 60 kN



รูปที่ 3 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นไฟน์แบลลงค์ที่ใช้พื้นที่เลื่อน การทำงานแบบ 3 จังหวะ [10]
ที่มา : Schuler (1998)

กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะส่วนใหญ่นิยมใช้ผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมขนาดเล็กสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนประกอบของงานเครื่องกล [7] ดังนั้นการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการทดลองเพื่อยืนยันผล จึงกำหนดให้มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก สะดวกต่อการวัดขนาดด้วยเครื่องมือพื้นฐาน สามารถผลิตขึ้นได้ง่าย และไม่อาศัยเครื่องมือพิเศษในการประกอบ แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สร้างสำหรับการทดลอง การออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์สำหรับการเปรียบเทียบยืนยันผล ระหว่างผลการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง และผลการจำลองกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดรายละเอียดของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับทดลอง

3.2.2 การทดลองยืนยันผล เป็นเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของการกำหนดสมการพฤติกรรมของวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองยืนยันผลได้นำชุดแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น โดยขั้นตอนที่ 1 การเตรียมก่อนการประมวลผล การเตรียมก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) เป็นขั้นตอนแรกสำหรับการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการออกแบบ และกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง ประกอบด้วยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดรูปแบบการจำลอง การกำหนดรูปแบบการจำลองเป็นขั้นตอนการกำหนดลักษณะของปัญหา ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท คือ การกำหนดแบบจำลองชนิดอนุกรม

คงที่ (Isothermal) และชนิดอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-Isothermal) ในงานวิจัยนี้กำหนดแบบจำลอง ชนิดอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดลักษณะของปัญหา การกำหนดลักษณะของปัญหา (Object Geometry) โดยรูปทรงที่มีอยู่ 2 ชนิด คือ แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) หรือ แบบจำลองแบบความเครียดในระนาบ (Plane Strain) ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) ขั้นตอนที่ 4 การควบคุมหลัก (Main Controls) เป็นขั้นตอนควบคุมช่วงเวลา การจำลองและแบ่งการคำนวณแบบจำลองนั้นออกเป็นช่วงสั้น ๆ (Step) โดยสามารถควบคุมด้วยเวลา หรือระยะเคลื่อนที่ และกำหนดจำนวนช่วงการคำนวณ (Number of simulation Steps) ขั้นตอนที่ 5 การสร้างแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นแผ่นงานเริ่มต้น และแท่งขึ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างภาคตัดวงกลมที่สมมาตร จึงสามารถลดเวลาและทรัพยากรในการประมวลผลด้วยการวิเคราะห์ปัญหาแบบ 2 มิติ ชนิดสมมาตรรอบ (2D Axisymmetric) การกำหนดสมบัติของวัสดุในของแบบจำลองให้เครื่องมือในแบบจำลองที่ประกอบด้วยพินช์ (Punch) ดาย (Die) แผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder) แผ่นต้านการเคลื่อนพินช์ (Counter punch) และวงแหวนบังคับตำแหน่ง (Guide ring) เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid body) กำหนดให้วัสดุแผ่นงาน (Blank material) มีสมบัติแบบยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic-Plastic) ใช้สมการควบคุมเกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion equation) ของ Oyane และสมการการเสียรูปร่างแบบพลาสติก เอลิเมนต์ที่เลือกใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองชิ้นงานเหล็กกล้ามาตรฐาน AISI 1045 เป็นเอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมสี่เหลี่ยม และจำนวนเอลิเมนต์ที่แบ่งจำนวน 10000 เอลิเมนต์ และกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของพินช์ให้มีทิศทางการเคลื่อนที่ลงในแนวแกน Y ด้วยความเร็วคงที่ 10 mm/s และขั้นตอนที่ 6 การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุ การกำหนดคู่สัมผัส คือการกำหนดคู่สัมผัส และความเสียดทานระหว่างวัตถุให้มีการสัมผัสระหว่างวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าตามมาตรฐาน AISI 1045 และวัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง AISI M4 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ทดสอบ 0.12 และค่าพิกัดระยะสัมผัส 0.0001 mm



รูปที่ 4 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สร้างสำหรับการทดลองติดตั้งบนเครื่องกดไฮดรอลิกส์เพื่อยืนยันผล

3.2.3 การประมวลผล (Analysis) ด้วยการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข ซึ่งจะทำให้การสร้างเอลิเมนต์ขึ้นมาใหม่โดยอัตโนมัติ (Automatic Adaptive Remeshing) เมื่อเอลิเมนต์เดิมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปมาก (Large Deformation) หรือ แสดงผลการแตกหัก หรือ ฉีกขาดของวัสดุด้วยวิธี ลบเอลิเมนต์ (Elements Deletion) การลบเอลิเมนต์ เมื่อค่าคำนวณวิกฤติเกินค่าคงตัวของวัสดุ

3.2.4 การแสดงผลหลังกระบวนการประมวลผล การแสดงผลหลังกระบวนการประมวลผล (Post-Processing) หลังจากการประมวลผลของกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเสร็จสิ้นแล้ว ผลที่ได้จากการประมวลผลจะแสดงในรูปของข้อมูลเชิงตัวเลข ภาพกราฟฟิก และกราฟความสัมพันธ์ เช่น กราฟความสัมพันธ์ของแรงต่อเวลา หรือ แรงต่อระยะการเคลื่อนที่ ความเค้น และความเครียด

3.3 การจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดชิ้นงานเริ่มต้น รัศมีขอบคมตัดของแม่พิมพ์ และสารหล่อลื่นที่มีผลส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาวิเคราะห์การเคลื่อนไหลตัวของเนื้อวัสดุที่มีต่อการกระจายความเค้น ความเครียด และความเค้นไฮโดรสแตติก บริเวณโดยรอบชิ้นงาน ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้การจำลองกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอธิบายพฤติกรรมซึ่งอาจเป็นปัจจัยกระทบที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยกำหนดรายละเอียดของแบบจำลอง

3.4 การอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามปัจจัยกำหนด เพื่อศึกษาพฤติกรรม

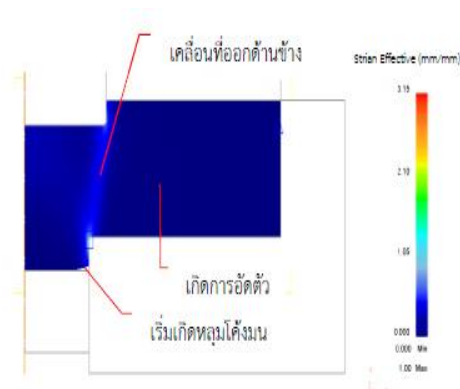
และปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการอธิบายอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานในลักษณะต่าง ๆ เช่น คุณภาพผิวชิ้นงาน ความยาวแท่งอัด การเคลื่อนไหลตัวของวัสดุ ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นงานเป็นต้น ซึ่งการอธิบายดังกล่าวจะอาศัยวิเคราะห์การประมวลผลจากแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยศึกษาที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟน์แบลงค์

3.5 การสรุปผลการวิจัย จากการวิเคราะห์ผลการจำลองการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟน์แบลงค์ ด้วยปัจจัยกระบวนการด้านขนาดชิ้นงานเริ่มต้น รัศมีพื้นซ์-ตาย และสี่สปริงที่ระดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบกับหลักการ และทฤษฎีระหว่างการจำลอง และการทดลอง พร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

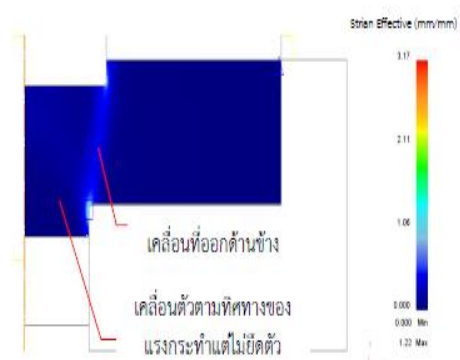
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลกระทบที่มีต่อการยุบตัวของโลหะแผ่น

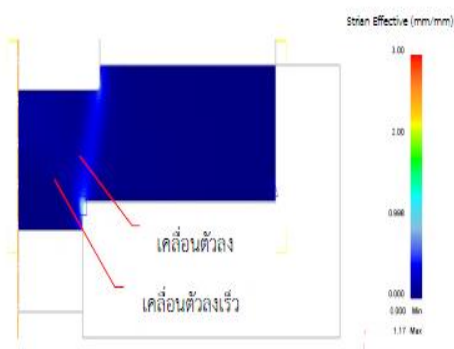
ขณะที่เนื้อวัสดุงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเคลื่อนไหลตัวผ่านปากแม่พิมพ์ เกิดการสัมผัสระหว่างวัสดุงานกับวัสดุแม่พิมพ์ และเกิดพฤติกรรมการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุจากการสัมผัสระหว่างผิว หรือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient) ซึ่งผลการทดสอบความเสียดทานระหว่างวัสดุชิ้นงาน และวัสดุแม่พิมพ์ ด้วยการใช้สปริงดันกลับในแม่พิมพ์ด้วยสปริง พบว่าการสัมผัสระหว่างวัสดุเครื่องมือตามมาตรฐาน AISI M4 และวัสดุงานเหล็กกล้า AISI 1045 ซึ่งความเสียดทานดังกล่าวมีอิทธิพลมากต่อแรงอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น



ก) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 20000



ข) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 40000

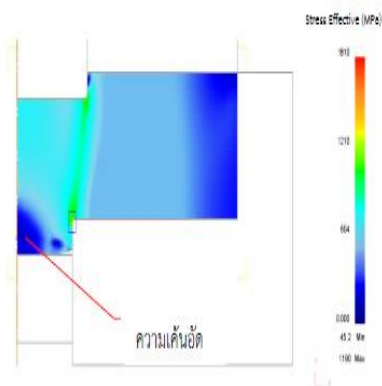


ค) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 60000

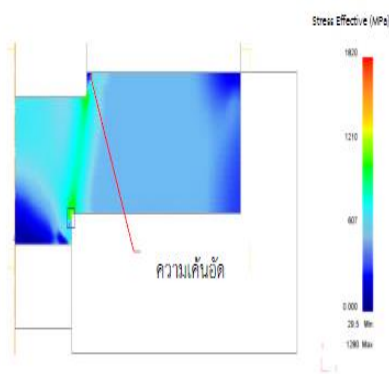
รูปที่ 5 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นซ์เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน

เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 5 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นซ์เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน พบว่า เมื่อพื้นซ์เริ่มเคลื่อนที่เข้าในเนื้อวัสดุงาน และเริ่มแทรกตัวไปในเนื้อของวัสดุ

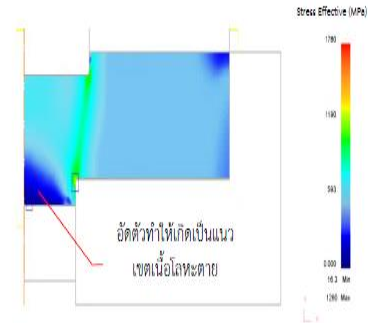
งานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของพินซ์ สังเกตเห็นว่าพินซ์ไหลผ่านปากกรูของตาย จนเริ่มเกิดเป็นส่วนนูนปรากฏบนผิวของวัสดุงานในด้านฝั่งตรงข้ามกัน และบางส่วนของเนื้อวัสดุงานที่ไหลเข้าปากกรูของตายไม่ได้ เนื่องจากการบังคับทิศทางการไหลของการออกแบบรูปร่างของพินซ์ทำให้เกิดการรักษาสมดุลปริมาตรวัสดุ โดยเกิดมีการเคลื่อนตัวไหลออกด้านข้างเล็กน้อย เมื่อกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 20000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้างชัดเจน และกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 40000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลมากขึ้นส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้างของวัสดุงานเพียงเล็กน้อย โดยถ้ามีแรงดัน (Counter Punch) น้อย จะเกิดการยุบตัว หรือเกิดหลุมยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดขึ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น เพราะว่า แรงต้านของแรงดัน (Counter Punch) เพียงแต่สัมผัสกับเนื้อวัสดุเล็กน้อย ทำให้ยุบตัวด้านท้ายแล้วดันออกด้านข้าง



ก) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 20000



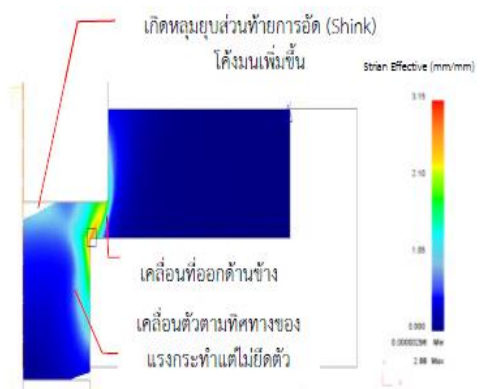
ข) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 40000



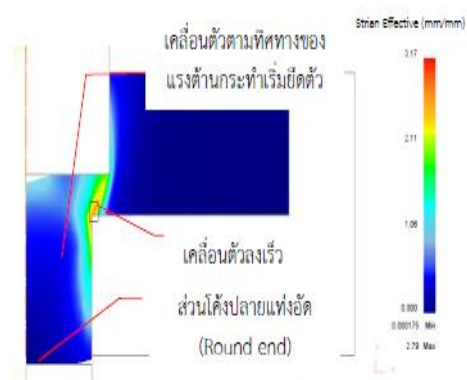
ค) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 60000

รูปที่ 6 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พินซ์เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน

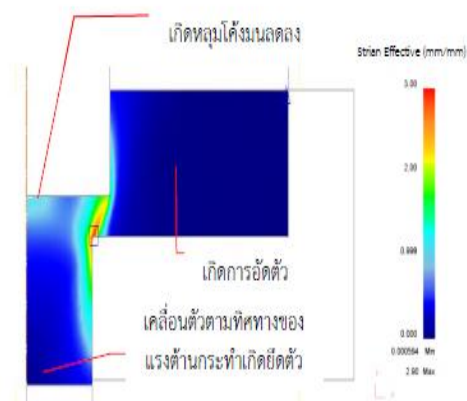
เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 6 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พินซ์เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน พบว่าเมื่อพินซ์เริ่มเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุงานมากขึ้น และกดแทรกตัวไปในเนื้อของวัสดุงานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของพินซ์ และเริ่มไหลผ่านปากกรูของตาย เนื้อวัสดุงานอีกส่วนหนึ่งเริ่มเคลื่อนตัวไหลออกด้านข้าง เพื่อการรักษาสมดุลปริมาตรวัสดุจึงมีผลทำให้เกิดการขยายตัวของแผ่นงานเริ่มต้นให้มีขนาดโตมากขึ้น โดยเริ่มเกิดความเสียหายระหว่างเครื่องมือกับเนื้อวัสดุงาน ซึ่งส่งผลทำให้การขึ้นรูปโลหะบริเวณของแนวแกนกลาง สามารถเคลื่อนไหลตัวได้ไม่สะดวกมากกว่าบริเวณผิวรอบนอกของวัสดุงานที่สัมผัสกับผิวของตาย และเนื้อโลหะเริ่มการอัดตัวกันแน่นจนเกิดเป็นบริเวณแนวเขตของเนื้อโลหะตาย (Dead metal zone) ที่ปรากฏคล้ายกับมุมเอียงให้กับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ



ง) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 20000



ข) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 40000

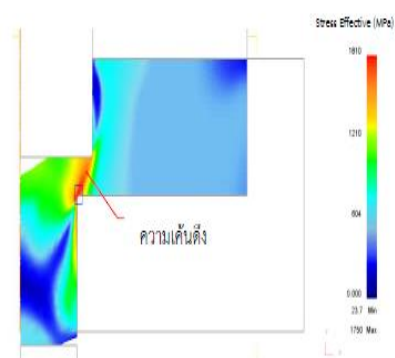


ค) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 60000

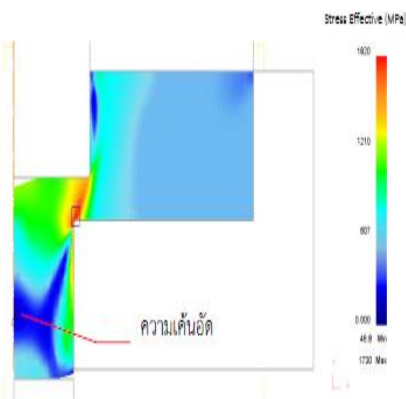
รูปที่ 7 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน

เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 7 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน พบว่าเมื่อพื้นที่เริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่สูงสุดในเนื้อวัสดุงาน และกดแทรกตัวไปในเนื้อของวัสดุงานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของพื้นที่ สังเกตเห็นว่าพื้นที่ไหลผ่านปากของตาย จนปรากฏเกิดเป็นส่วนนูนบนผิวของวัสดุงานในด้านฝั่งตรงข้ามกัน และบางส่วนของเนื้อวัสดุงานที่ไหลเข้าปากของตายไม่ได้ เนื่องจากการบังคับทิศทางการไหลของการออกแบบรูปร่างของพื้นที่ทำให้เกิดการรักษาสมาดุลปริมาตรวัสดุ โดยเกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏหลุมยุบชัดเจน เมื่อกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 20000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงาน

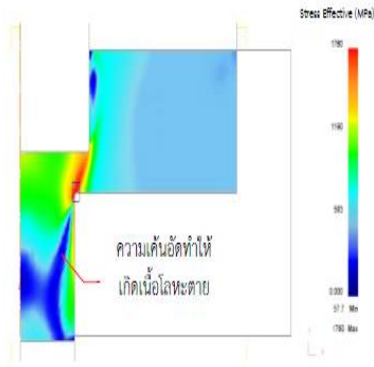
เพิ่มมากขึ้น และกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 60,000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลมากขึ้นส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงานเพียงเล็กน้อย โดยถ้ามีแรงดัน (Counter Punch) มากขึ้น จะเกิดการยุบตัว หรือเกิดหลุมยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดขึ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นน้อยลง เพราะว่า แรงต้านของแรงดัน (Counter Punch) สัมผัสกับเนื้อวัสดุมากขึ้น ทำให้ยุบตัวเคลื่อนตัวตามทิศทางของแรงดันเกิดการยืดตัว แต่ดันออกด้านข้างเพียงเล็กน้อย



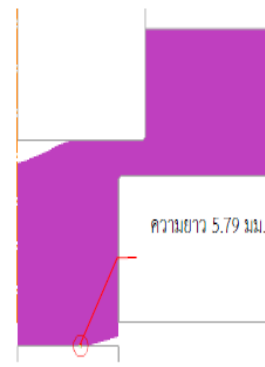
ง) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 20000



จ) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 40000



ค) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 60000



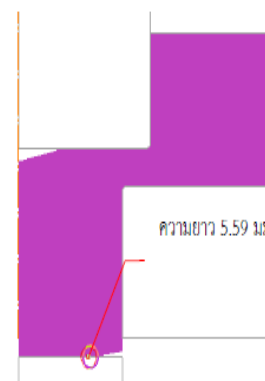
ก) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 20000

รูปที่ 8 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พินซ์เคลื่อนแทรกเข้าสู่สูงสุดในเนื้อวัสดุงาน

เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 8 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พินซ์เคลื่อนแทรกเข้าสู่สูงสุดในเนื้อวัสดุงาน พบว่าเมื่อพินซ์เริ่มเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุงานมากขึ้น และกดแทรกตัวสูงสุดไปในเนื้อของวัสดุงานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของพินซ์ และไหลผ่านปากของตาย เนื้อวัสดุงานอีกส่วนหนึ่งเคลื่อนตัวไหลออกด้านข้าง เพื่อการรักษาสมดุลปริมาตรวัสดุจึงมีผลทำให้เกิดการขยายตัวของแผ่นงานเริ่มต้นให้มีขนาดโตมากขึ้น โดยเกิดความเสียหายระหว่างเครื่องมือกับเนื้อวัสดุงาน ซึ่งส่งผลทำให้การขึ้นรูปโลหะบริเวณของแนวแกนกลาง สามารถเคลื่อนไหลตัวได้สะดวกมากกว่าบริเวณผิวรอบนอกของวัสดุงานที่สัมผัสกับผิวของตาย และเนื้อโลหะที่มีการอัดตัวกันแน่นจนเกิดเป็นบริเวณแนวเขตของเนื้อโลหะตาย (Deat metal zone) ที่ปรากฏคล้ายกับมุมเอียงให้กับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ

4.2 ผลกระทบที่มีต่อขนาดความยาวแท่งอัด

การพิจารณาอิทธิพลของแรงดัน (Counter Punch) ที่มีต่อขนาดความยาวแท่งอัด (Length of extrusion rod) ในเบื้องต้น พบว่ามีแนวโน้มในทิศทางตรงข้ามกัน กล่าวคือ ค่าแรงดัน (Counter Punch) ของชิ้นงานเริ่มต้น ที่มีค่าสูงจะมีผลทำให้แท่งอัดมีความยาวน้อยด้วย



ข) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 40000



ค) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 60000

รูปที่ 9 ขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่ได้จากการจำลองการทำงานในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 9 การวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างขนาดชิ้นงานเริ่มต้น และแรงดัน (Counter Punch) ที่มีต่อขนาดความยาวแท่งอัด (Length of extrusion rod) พบว่าขนาดความยาวของแท่งอัดที่มีค่าน้อยที่สุด คือ การอัดขึ้นรูปชิ้นงานเริ่มต้นที่มีแรงดัน (Counter Punch) ขนาด 60,000 N และสำหรับกรณีที่มีขนาดความยาวของแท่งอัดที่มีค่ามากที่สุด คือ การอัดขึ้นรูปชิ้นงานเริ่มต้นแรงดัน (Counter Punch) ขนาด 20,000 N

5.สรุปผลการวิจัย

อิทธิพลของแรงดันกลับ (Counter Punch) จะมีผลกระทบที่มีต่อความเค้นในชิ้นงาน โดยปรากฏชัดเจนเมื่อวัสดุบริเวณขอบรัศมีของคมตัดจะถูกดันเลื่อนแหวกออกจากกัน ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของความเค้นไฮโดรสแตติกของเนื้อวัสดุงานในแนวแถบการเฉือนมีการกระจายตัวสูงกว่ารัศมีขอบคมตัดขนาดเล็ก และเคลื่อนไหลตัวเข้าสู่แผ่นงานได้ง่ายขึ้น การไหลตัวของเนื้อวัสดุในชิ้นงาน เนื้อวัสดุจึงเคลื่อนไหลตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุงานที่ถูกบังคับขอบเขตจากแรงดัน (Counter Punch) ที่มีแรงดันมาก ความเครียดในชิ้นงาน สำหรับแรงดัน (Counter Punch) ต่อการกระจาย มีแรงดันน้อยจะมีผลที่สามารถเคลื่อนแทรกตัวเข้าเนื้อวัสดุ ความเครียดในชิ้นงานได้สะดวก และยุบตัวในส่วนท้ายของการอัด โดยเกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏหลุมยุบชัดเจน เมื่อกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 20000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงานเพิ่มมากขึ้น และกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 60000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลมากขึ้นส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงานเพียงเล็กน้อย โดยถ้ามีแรงดัน (Counter Punch) มีหลุมมากขึ้น จะเกิดการยุบตัว หรือเกิด ยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดขึ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นน้อยลง เพราะว่า แรงต้านของแรงดัน (Counter Punch) สัมผัสกับเนื้อวัสดุมากขึ้น ทำให้ยุบตัวเคลื่อนตัวตามทิศทางของแรงต้านเกิดการยึดตัว แต่ดันออกด้านข้างเพียงเล็กน้อย [5,8,12] ซึ่งจะทำให้การสร้างความเค้นอัดบริเวณรอบหลุมอัดลดลง และเกิดตายโรล (Die roll) ดังนั้นหลักการ และการใช้วัสดุในการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากงานวิจัย

[8,9,12] พบว่า ผลการทดลอง และการจำลองให้ผลในทิศทางเดียวกัน จึงเชื่อได้ว่าผลการจำลองจะสามารถอธิบายพฤติกรรมกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นได้เทียบเคียง และแม่นยำตรงกับความจริง

6.อภิปรายผลการวิจัย

การเปรียบเทียบผลของการวัดขนาดของชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นขึ้นรูปด้วยที่ได้จากการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความยาวที่ได้จากการจำลอง คือ 5.44 มม., 5.59 มม. และ 5.79 มม. ซึ่งผลของการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ช่วยให้ทราบพฤติกรรมของวัสดุภายในกระบวนการ และนำไปสู่การหลีกเลี่ยงการผลิตชิ้นงานที่มีจุดบกพร่อง การศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัว (Shrink) ของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นกระบวนการไฟน์แบล็ก พบว่าการอัดตัวกันแน่นของเนื้อวัสดุหรือขอบเขตบริเวณก่อนโลหะตาย (Dead metal zone) มักจะมีผลต่อการต้านแรงกระทำหรือแรงอัดขึ้นรูปได้ และสำหรับกรณีการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยขนาดของแรงดัน (Counter Punch) ที่มีขนาดมาก จะการเกิดจุดบกพร่องแบบยุบตัวที่ส่วนท้ายของการอัดน้อย และแรงดัน (Counter Punch) ที่มีขนาดน้อยจะการเกิดจุดบกพร่องแบบยุบตัวที่ส่วนท้ายของการอัดมาก เมื่อแรงดัน (Counter Punch) ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปลายโค้งลดลง ขณะเดียวกันมีผลทำให้หลุมยุบส่วนท้ายการอัดลดลง อีกทั้งส่งผลต่อแรงอัดขึ้นรูปอีกด้วย ซึ่งสามารถช่วยพยากรณ์แรงสำหรับการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในเบื้องต้นสำหรับวางแผนการผลิต หรือ เลือกขนาดเครื่องจักรได้แม่นยำ

ดังนั้น เพื่อลดปัญหาการเกิดการยุบตัว หรือหลุมยุบส่วนท้ายการอัดในชิ้นงาน ควรกำหนดปัจจัยขนาดของแรงดัน (Counter Punch) ด้วยการเลือกปัจจัยข้างต้นที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตามสมการพยากรณ์ที่เสนอแนะ หรือจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อช่วยให้ทราบพฤติกรรมของวัสดุภายในกระบวนการ จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานได้อย่างกว้างขวางต่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมกระบวนการผลิต และช่วยลดความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้

7.ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยอิทธิพลที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับผู้ที่จะศึกษาวิจัยต่อไป ควรพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนต่างๆ ดังนี้

7.1ด้านกระบวนการทางแม่พิมพ์ เช่น การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการอัดขึ้นรูป การศึกษาขนาดแรงกดแบบลงค์ไฮดรอลิก และเคาน์เตอร์พันซ์ที่เหมาะสม การศึกษาเปรียบเทียบชนิดวัสดุ ระดับความเรียบผิว และการสึกหรอของแม่พิมพ์ เป็นต้น

7.2ด้านกระบวนการผลิต และควบคุม เช่น การศึกษาผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น และการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทำงานแตกต่างกัน ความเร็วในการอัดขึ้นรูประดับต่างๆ เป็นต้น

7.3ด้านกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ เช่น การอัดขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานประเภทอื่น การอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างแบบอื่น และการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นขนาดเล็กมาก (Micro extrusion) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุทัศน์ ทิพย์ปัทมาศ, มาฮาอีโกะ จิน และมาฮาโอะ มูราคาว่า, “การวิเคราะห์การไหลของเนื้อวัสดุของรอยฉีกขาดในงานตัดโฟมแบล็ก”, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร* ปีที่ 30, 2550, หน้า 293 – 300.
- [2] สุริยา ประสมทอง และเกียรติพงศ์ อรรถ, “การเพิ่มประสิทธิภาพของการขึ้นรูปแผ่นโดยอาศัยความเค้นตกค้างและความหยาบของพื้นผิวด้วยกระบวนการขึ้นรูปที่ละจุด (TPIF) ของโลหะขึ้นส่วนผสมอะลูมิเนียม”, [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/ijst/article/view/6059/pdf_389 .สืบค้น 25 พฤศจิกายน 2566.
- [3] สุรวุฒิ ยะนิล, ชาญ ถนังงาน และศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์, “การวิเคราะห์หาแรงในการโฟมแบล็กโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* ปีที่ 13, 2546, หน้า 52 – 58.
- [4] Bopit Bubphachot. “Microstructure Affecting Cutting Quality in Fine Blanking Process,” *American Journal of Engineering and Applied Sciences*;2009. 2(4): 665-668.
- [5] Chatkaew Suriyapha, Suthep Yiemchaiyaphum and Bopit Bubphachot. “Die Radius Affecting Sheet Metal Extrusion Quality for Fine Blanking Process,” *American Journal of Engineering and Applied Sciences*;2010. 3(2): 476-481.
- [6] F. Maqbool and M.Bambach. “Experimental and numerical investigation of the influence of process parameters in incremental sheet metal forming on residual stresses,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*; 2019. 3(2): 31.
- [7] Hirota, K. 2007. “Fabrication of micro-billet by sheet extrusion”. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1–3), 283–287.
- [8] K. Hirota, H. Yanaga, and K. Fukushima. “Experimental and Numerical Study on Blanking Process with Negative Clearance,” *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*; 2009. 3(2): 247-255.
- [9] P.F. Zheng, L.C. Chan and T.C. Lee, “Numerical Analysis of the Sheet Metal Extrusion Process,” *Finite Elements in Analysis and Design*; 2005. 42, 189-207.
- [10] Schuler, G. 1998. *Metal Forming Handbook*: Springer Berlin.

- [11] S.M.Najm and I. Paniti, "Predict the effects of forming tool characteristics on surface roughness of aluminum foil components formed by SPIF using ANN and SVR, " *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*; 2021. 22: 13-26.
- [12] Suriyapha C., Rittidech S. and Bubphachot B. "Material Flow Behaviour on Fine Blanking Process for Sheet Metal Extrusion," *Asian International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing Engineering*; 2011. 4(1): 77-80.
- [13] Sutasn Thipprakmas, Masahiko Jin and Masao Murakawa. "An Investigation of Material Flow Analysis in Fineblanking Process," *Journal of Materials Processing Technology*; 2007. 192–193, 237–242.
- [14] Sutasn Thipprakmas, Masahiko Jin, Kanaizuka Tomokazu, Yamamoto Katsuhiro, and Masao Murakawa. "Prediction of Fineblanked Surface Characteristics Using the Finite Element Method (FEM)," *Journal of Materials Processing Technology*; 2008. 198, 391-398.
- [15] W.F. Fan and J.H. Li. "An Investigation on the Damage of AISI-1045 and AISI-1025 Steels in Fine-Blanking with Negative Clearance," *Materials Science and Engineering A*; 2009. 499, 248-251.
- [16] Z.H. Chen, C.Y. Tang, L.C. Chan and T.C. Lee. "Simulation of the Sheet Metal Extrusion Process by the Enhanced Assumed Strain Finite Element Method," *Journal of Materials Processing Technology*; 1999. 250-256.
- [17] Z. Zhao, X.C. Zhuang and X.L. Xie. "An Improved Ductile Fracture Criterion for Fine-blanking Process," *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*; 2008. 13(6), 702–706