ความสัมพันธ์ของระยะเผื่อเชฟและผิวงานตัดในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันช์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ [1] สิริพร โรจนนันต์ [2]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
และ ประวิตร ปรมาภูติ [3]
บริษัท ศรีสหวัฒนกิจ จำกัด

รับเมื่อ 21 เมษายน 2550 ตอบรับเมื่อ 3 กรกฎาคม 2550

บทคัดย่อ

ในกระบวนการงานขึ้นรูปโลหะ กระบวนการตัดเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างยิ่งในการตัดแยกวัสดุออกมาเป็นชิ้นงานสำเร็จ ดังนั้นคุณภาพของผิวงานตัดจึงมีความสำคัญโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน หนึ่งในกระบวนการตัดเฉือนที่นิยมใช้กันเพื่อให้ได้ผิวงานตัดที่มีความได้ฉากและมีส่วนเรียบตรงที่มากคือกระบวนการตัดเชฟ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการตัดเชฟนั้นจะต้องทำการตัดเฉือนมาก่อนหนึ่งครั้ง ซึ่งส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ทั้งในกระบวนการตัดเฉือนและในกระบวนการตัดเชฟมีมาก เช่น ค่าเคลียร์แรนช์ของกระบวนการตัดเฉือน และค่าระยะเผื่อเชฟของกระบวนการตัดเชฟ ทำให้การควบคุมคุณภาพของผิวงานตัดทำได้ยาก จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นจึงได้มีการนำเสนอการใช้สเตปเทเปอร์พันช์ ซึ่งมีลักษณะเป็นสเตปสำหรับกระบวนการตัดเฉือนและสำหรับกระบวนการตัดเชฟซึ่งสามารถทำได้อย่างต่อเนื่องของการเคลื่อนที่พันช์หนึ่งสโตรก ดังนั้นจึงทำให้สามารถลดขั้นของการทำงานซึ่งส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ทั้งในกระบวนการตัดเฉือนและในกระบวนการตัดเชฟ เช่น ค่าระยะเผื่อเชฟ ก็ยังไม่ได้มีการศึกษาสรุปผลไว้ ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาในอดีตเป็นการศึกษาโดยการทดลอง ดังนั้นจึงทำให้มีข้อจำกัดของขอบเขตการทดลอง ซึ่งจากผลของงานวิจัยในอดีตที่ได้ทำการศึกษาจะได้ว่ามุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสมนั้นคือ 6 องศา

ดังนั้นสำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของระยะเผื่อเชฟและผิวงานตัดในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ที่มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อที่จะสามารถทำการศึกษาได้ในขอบเขตที่กว้างขึ้น โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงระยะเผื่อเชฟที่ส่งผลต่อการไหลของเนื้อวัสดุ และความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะผิวงานตัดที่ได้ โดยที่เมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ส่วนเรียบตรงลดลงแต่ส่วนแตกจะเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผลการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับการตัดเฉือนและตัดเชฟโดยกระบวนการปกติพบว่าจะให้ผลของคุณภาพผิวงานตัดที่ดีขึ้น ดังนั้นจากผลการศึกษาจะทำการสรุปได้ว่ากระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พันช์สามารถที่จะทำการลดขั้นตอนการทำงานลงได้ โดยที่ให้ผลของคุณภาพผิวงานตัดที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการตัดเฉือนและตัดเชฟโดยกระบวนการปกติ นอกจากนี้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถทำการอธิบายถึงกลไกและผลของค่าระยะเผื่อเชฟ รวมทั้งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเผื่อเชฟและผิวงานตัดได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาและต้นทุนสำหรับการลองผิดลองถูกโดยกระบวนการทดลองได้

---

[1] *อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ*
[2] *อาจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ*
[3] *วิศวกร*

Relationship between Shaving Allowance and Cut Surface in the Shearing Process by Step Taper Shaped Punch using Finite Element Method

Sutasn Thipprakmas [1], Siriporn Rojananan [2]
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmood, Toongkru, Bangkok 10140
and Pravitr Paramaphuti [3]
Srisahawattanakij Inc.

Received 21 April 2007 ; accepted 3 July 2007

Abstract

One of the important processes in the metal forming field is the shearing/blanking process. This process is used for separating sheet metal into the product and scrap. Therefore, the quality of product directly depends on the quality of the cut surface. Nowadays, the conventional shaving process is used to produce the high quality of the cut surface needing the smooth cut without cracks. However, the shearing/blanking process is necessary before doing the shaving process. Therefore, the relationship of the numerous process parameters between the shearing and shaving processes to obtain the good quality cut surface such as the clearance in the shearing process and the shaving allowance in the shaving process is very complexity and causes the time and cost production. As the mentioned problem, the step taper punch was proposed and investigated because this process can be continuously shear and shave as the one punch stroke, hence, reducing the step of the operations and cost and time production. Although this process was investigated in the past researches, the relationship between the shaving allowance and the cut surface was not done. Moreover, the past researches were investigated by experiments. Therefore, the mechanism and the effect of the process parameters can not be theoretically clarified. The optimal taper angle was 6 degree which was investigated by experiments in the past research. Therefore, in this study, the relationship between the shaving allowance and the cut surface with the 6 degree taper angle was investigated by using the finite element method. As a result, the shaving allowance directly affected on the material flow, the stress distribution and the cut surface also. The smooth cut decreased and the cracks increased as the shaving allowance increased. The optimal shaving allowance was approximately 0.2 mm. Moreover, the quality of cut surface obtained by the step taper punch was better than it obtained by the conventional shaving. Therefore, the step taper punch can be used as the process reducing the process operation. From the results, it indicated that the FEM simulation could be a useful tool for predicting the cut surface features in the step taper shaped punch shearing process.

---

[1] *Lecturer, Department of Tool and Materials Engineering.*

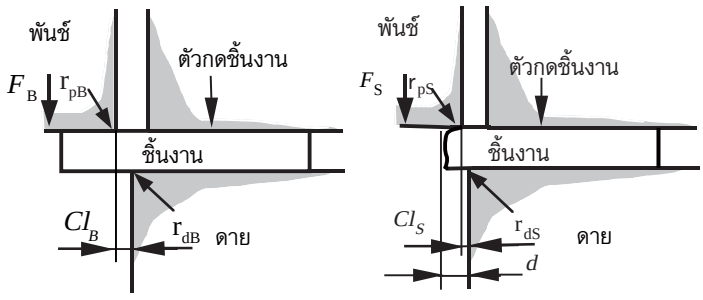
[2] *Lecturer, School of Energy Environment and Materials.*

[3] *Engineer.*

1. บทนำ

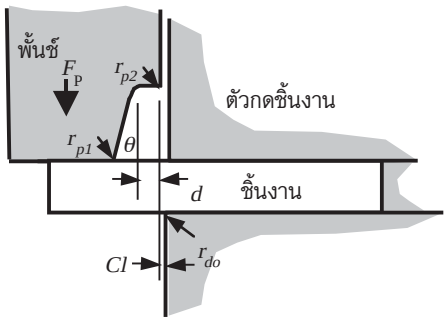
กระบวนการขึ้นรูปโลหะเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะเป็นกระบวนการผลิตที่สามารถทำการผลิตได้ปริมาณมากและรวดเร็ว กระบวนการตัดเฉือนซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะและมีความสำคัญ เนื่องจากกระบวนการตัดเฉือนเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการตัดขาดของวัสดุได้มาเป็นชิ้นงานผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ดังนั้นคุณภาพของผิวงานตัดที่ได้ก็จะมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน หนึ่งในกระบวนการตัดเฉือนที่นิยมใช้กันเพื่อให้ได้ผิวงานตัดที่มีความได้ฉากและมีส่วนเรียบตรงที่มากคือกระบวนการตัดเชฟ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการตัดเชฟนั้นจะต้องทำการตัดเฉือนมาก่อนหนึ่งครั้งดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ทั้งในกระบวนการตัดเฉือนและในกระบวนการตัดเชฟที่มีมาก เช่น ค่าเคลียร์แรนซ์ของกระบวนการตัดเฉือนและค่าระยะเผื่อเชฟของกระบวนการตัดเชฟ ทำให้การควบคุมคุณภาพของผิวงานตัดทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการทำการศึกษาถึงกระบวนการตัดเชฟอย่างต่อเนื่อง รายงานวิจัยในอดีต C. Stromberger และคณะ [1] ได้ทำการนำเสนอการตัดเชฟด้วยการใช้สเตปเทเปอร์พันช์ ซึ่งมีลักษณะเป็นสเตปสำหรับกระบวนการตัดเฉือนและสำหรับกระบวนการตัดเชฟจึงทำให้สามารถทำการตัดได้อย่างต่อเนื่องของการเคลื่อนที่พันช์หนึ่งสโตรก ดังแสดงในรูปที่ 2

M. Murakawa และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าเคลียแรนซ์ของกระบวนการตัดเฉือนและค่าระยะเผื่อเชฟของกระบวน การตัดเชฟโดยการใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ H. Sasahara และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาถึงกลไกการตัดเชฟด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ จากที่กล่าวข้างต้นกระบวนการตัดเชฟด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ สามารถทำการลดขั้นตอนของการทำงานลงได้ ซึ่งส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ทั้งในกระบวนการตัดเฉือนและในกระบวนการตัดเชฟ เช่น ค่าระยะเผื่อเชฟ ก็ยังไม่ได้มีการศึกษาสรุปผลไว้ ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาในอดีตเป็นการศึกษาโดยการทดลอง ดังนั้นจึงทำให้มีข้อจำกัดของขอบ เขตการทดลอง ซึ่งผลจากงานวิจัยในอดีตจะได้ว่ามุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสมคือ 6 องศา ดังนั้นสำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของระยะเผื่อเชฟและผิวงานตัดในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พั้นช์ที่มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นเทคนิควิธีที่เป็นที่ยอมรับและมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้มีการทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองจากงานวิจัยในอดีตเป็นจำนวนมาก [2-6]



(ก) ขั้นตอนการตัดเฉือน (ข) ขั้นตอนการตัดเชฟ

รูปที่ 1 กระบวนการตัดเฉือนและตัดเชฟโดยทั่วไป



รูปที่ 2 กระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันช์

จากผลการทำการจำลองจะได้ว่า สามารถทำการอธิบายถึงผลกระทบของค่าระยะเผื่อเชฟที่มีผลต่อคุณภาพของผิวงานตัดได้ โดยอธิบายผ่านทางการไหลตัวของเนื้อวัสดุภายในชิ้นงาน ซึ่งส่งผลต่อการกระจายความเค้นในเนื้อวัสดุ และส่งผลทำให้เกิดรอยตัดที่มีคุณภาพผิวงานตัดที่แตกต่างกัน โดยที่เมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ส่วนเรียบตรงลดลงแต่ส่วนแตกจะเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผลการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับการตัดเฉือนและตัดเชฟโดยกระบวนการปกติพบว่า จะให้คุณภาพผิวงานตัดที่ดีขึ้น

ดังนั้นจากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้จะทำการสรุปได้ว่ากระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พันช์สามารถที่จะทำการลดขั้นตอนการทำงานลงได้ โดยที่ให้ผลของคุณภาพผิวงานตัดที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการตัดเฉือนและตัดเชฟโดยกระบวนการปกติ นอกจากนี้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถทำการอธิบายถึงกลไกและผลของค่าระยะเผื่อเชฟ รวมทั้งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเผื่อเชฟและผิวงานตัดได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาและต้นทุนสำหรับการลองผิดลองถูกโดยกระบวนการทดลองได้

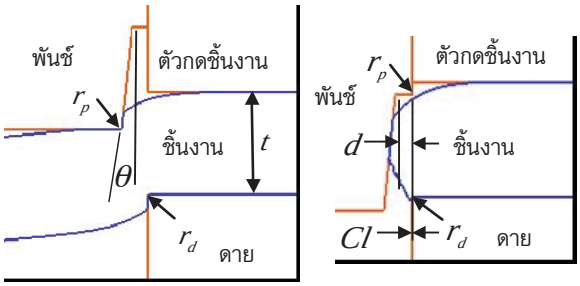
2. วิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พันช์สำหรับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การจำลองแบบ 2 มิติ ความเครียดระนาบ และใช้โปรแกมเชิงพาณิชย์ DEFORM-2D โดยวัสดุชิ้นงานที่จะทำการตัดเป็นอะลูมิเนียม Al1100-O (มาตรฐาน JIS) ขนาดความหนา 3 มม. โดยสมการคอนสติตูทีฟว์ของวัสดุได้มาจากการทำการทดสอบแรงดึงโดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยในอดีต [2] ชิ้นงานจะถูกกำหนดให้เป็นวัสดุอิลาสติก-พลาสติก สำหรับพันช์ ดาย และตัวกดชิ้นงานจะถูกกำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็ง ดังแสดงในตารางที่ 1 ในการศึกษานี้กำหนดรูปแบบของเอลิเมนต์เป็นสี่เหลี่ยม และมีจำนวนประมาณ 3,000 เอลิเมนต์ นอกจากนี้ยังได้ทำการกำหนดให้บริเวณแนวการตัดเฉือนมีความละเอียดของเอลิเมนต์ที่มากขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 4 และได้ทำการกำหนดให้มีการทำการปรับเอลิเมนต์ใหม่ (Adaptive remeshing) ทุกๆ 3 สเตป เพื่อป้องกันการลู่ออก (Divergence) ระหว่างการคำนวณ โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาที่ค่าระยะเผื่อเชฟ 0.2, 0.3, และ 0.5 มม. โดยที่มุมเอียงเทเปอร์เท่ากับ 6 องศา และมีความสูงของส่วนที่เป็นเทเปอร์เท่ากับ 3 มม. เท่ากับความหนาของชิ้นงาน ค่าเคลียร์แรนซ์ของขั้นตอนการตัดเชฟเท่ากับ 0% ความหนาชิ้นงาน สำหรับสมการการแตกหักจะใช้สมการของ Normalized Cockroft & Latham ดังแสดงในสมการที่ (1) โดยที่ค่าการแตกหักวิกฤต (Critical Value Factor, C) คือ 0.98 โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยในอดีต [2]

$$C = \int_{0}^{\bar{\varepsilon}f} \left[\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}}\right] d\bar{\varepsilon} \qquad \textbf{(1)}$$

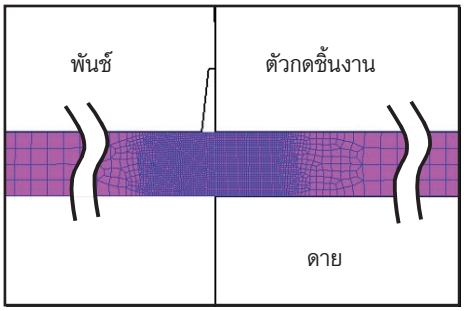
โดยที่

C คือ Critical fracture value
σ^* คือ Maximum principle stress
$\bar{\sigma}$ คือ Effective stress
$\bar{\varepsilon}$ คือ Effective strain



(ก) ขั้นตอนการตัดเฉือน (ข) ขั้นตอนการตัดเชฟ

รูปที่ 3 โมเดลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4 การสร้างเอลิเมนต์ในโมเดล
การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

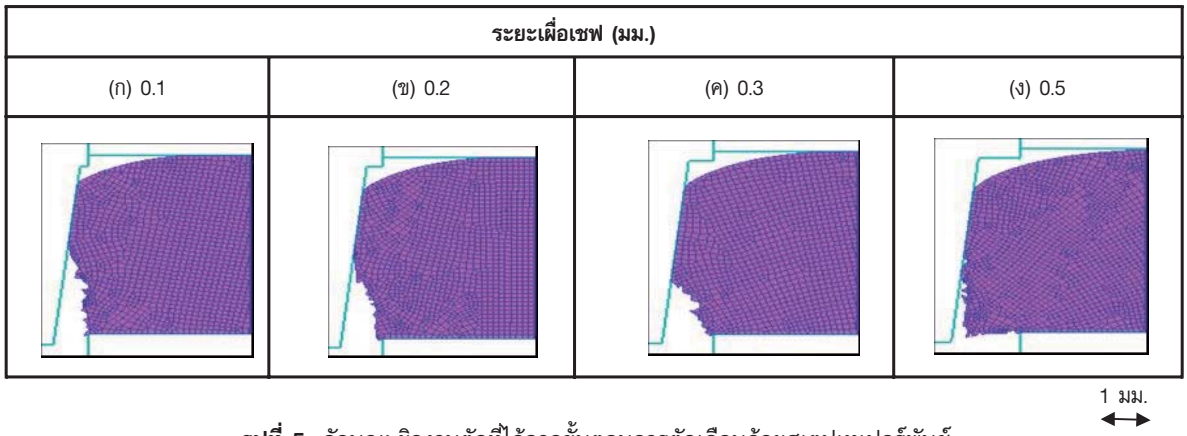
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Simulation model	Plain strain model
Object type	Blank: Elastic-Plastic Punch/Die: Rigid Blank Holder: Rigid
Blanked material	A1100-O, Thickness 3 mm (Tensile strength =92.5 MPa, Elongation = 46.0%)
Flow curve equation	$\bar{\sigma} = 160.4\bar{\varepsilon}^{0.22}$
Tool cutting radius	r_p, r_d : 0.01 mm
Taper angle	6°
Shaving allowance	0.2, 0.3, 0.5 mm
Fracture criterion equation	Normalized Cockroft & Latham
Critical fracture value (C)	0.98
Friction coefficient (μ)	0.1

3. ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์ผล

3.1 เปรียบเทียบผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันช์

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผิวงานตัดที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ จากผลการจำลองจะได้ว่าลักษณะความได้ฉากของขอบผิวงานตัดมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยจะสูญเสียความได้ฉากมากขึ้นและส่วนโค้งมนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่าระยะเผื่อเชฟมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเผื่อเชฟที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้วัสดุเกิดการไหลตัวที่ดีขึ้น ดังนั้นทำให้เกิดการขาดได้ยากขึ้น และจะสังเกตได้ว่าที่ระยะเผื่อเชฟน้อยๆ เช่นในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) จะพบว่าเกิดการแตกขาดของวัสดุชิ้นงานที่รวดเร็วทั้งของฝั่งพันช์และดาย ซึ่งส่งผลทำให้รอยแตกหักที่ได้อยู่ในแนวเดียวกับขอบคมตัดของดาย ซึ่งจะส่งผลทำให้ส่วนยื่นสำหรับการตัดเชฟมีขนาดเล็กมาก จนอาจทำให้เมื่อทำการตัดเชฟจะมีโอกาสที่จะเกิดการตกค้างของรอยแตกหักหลงเหลืออยู่ นอกจากนี้เมื่อระยะเผื่อเชฟมีค่ามากขึ้น การแตกหักจนแยกออกจากกันของชิ้นงานก็จะช้าลง ทำให้สูญเสียความได้ฉากมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) และ 5(ค) และเมื่อระยะเผื่อเชฟมีค่าเพิ่มมากขึ้น เช่นในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5(ง) จะพบว่ามีลักษณะการแตกขาดของชิ้นงานที่แตกต่างกันกับที่ระยะเผื่อเชฟน้อยกว่า 0.5 มม กล่าวคือจะเกิดการแตกขาดของชิ้นงานจนแยกออกจากกันช้ามากขึ้น จึงทำให้เกิดการแตกขาดในลักษณะการยืดฉีกขาดที่บริเวณปากดาย ดังแสดงในรูปที่ 5(ง)

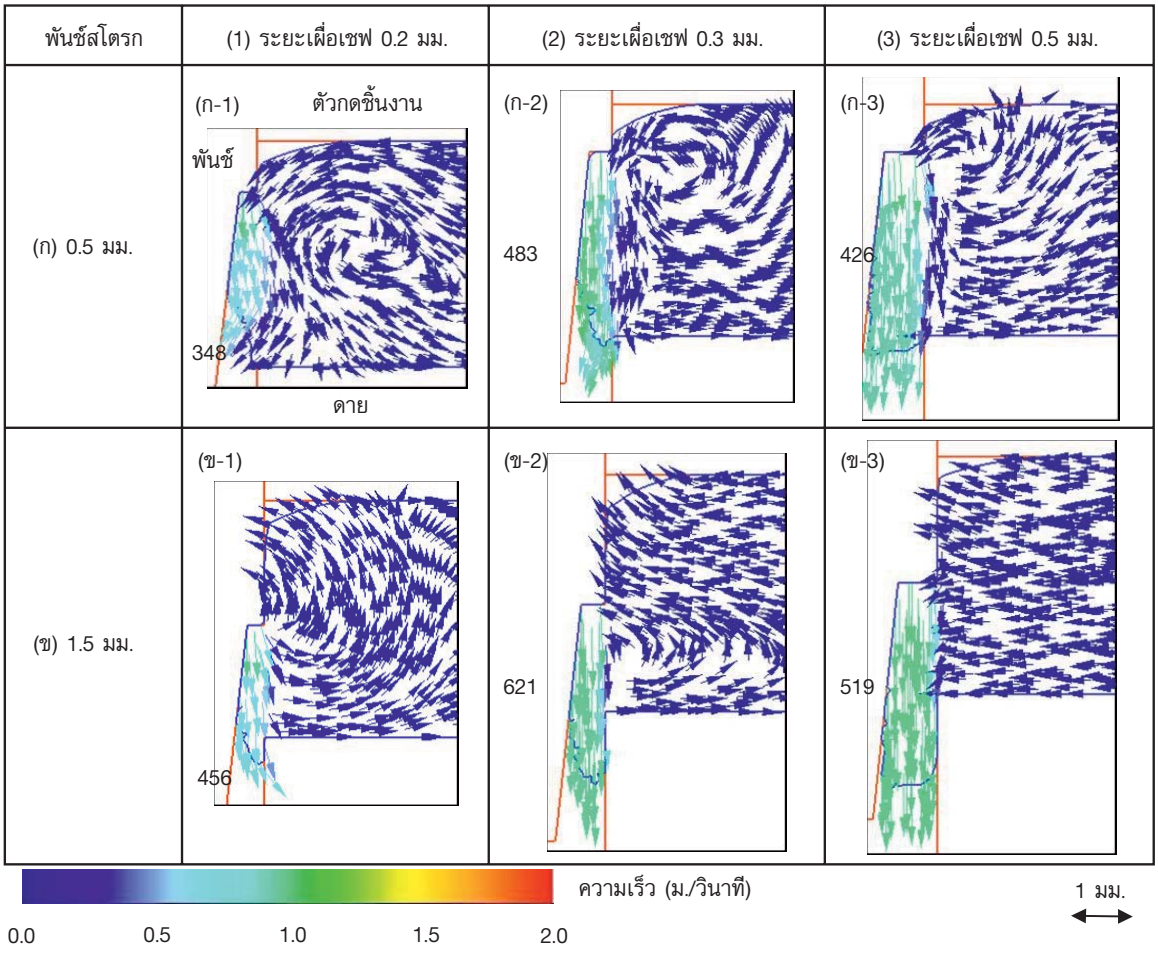


รูปที่ 5 ลักษณะผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา)

3.2 เปรียบเทียบการไหลตัวของเนื้อวัสดุในขั้นตอนการตัดเชฟด้วยสเตปเทเปอร์พันช์

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการไหลตัวของเนื้อวัสดุในขั้นตอนการตัดเชฟด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ที่ระยะเผื่อเชฟที่แตกต่างกัน ในกรณีของระยะพันช์สโตรก 0.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) ที่ระยะเผื่อเชฟ 0.2 มม. จะได้ว่าลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุในส่วนที่ถูกตัดเชฟจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวการเคลื่อนที่ของพันช์ แต่จะมีบางส่วนถูกอัดให้เคลื่อนที่เข้าหาฝั่งของชิ้นงานตามลักษณะรูปร่างของพันช์ที่เป็นมุมเอียงเทเปอร์ และระยะเผื่อเชฟที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นการไหลตัวของเนื้อวัสดุในส่วนนี้จะมีทิศทางการเคลื่อนที่เป็นแนวเอียงเข้าไปในส่วนของชิ้นงาน ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของการไหลของเนื้อวัสดุในฝั่งชิ้นงานซึ่งปกติจะมีทิศทางการเคลื่อนที่มาทางฝั่งของพันช์ ทำให้เนื้อวัสดุในฝั่งของชิ้นงานไหลตัววนกลับไปในทิศทางของฝั่งชิ้นงาน และทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุของชิ้นงานเกิดเป็นลักษณะการไหลวน ดังแสดงในรูปที่ 6(ก-1) สำหรับในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.3 มม. จะได้ลักษณะการไหลตัวที่คล้ายกับในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.2 มม. แต่เนื่องจากเมื่อระยะเผื่อเชฟมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ช่องว่างระหว่างพันช์และดายมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุในส่วนที่ถูกตัดเชฟเคลื่อนที่ลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพันช์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นส่วนที่จะไหลตัวเข้ามาในฝั่งของชิ้นงานก็จะมีขนาดลดลง ทำให้ความเข้มของแนวการขวางการเคลื่อนที่จากฝั่งชิ้นงานลดลง ดั้งนั้นความเข้มของการไหลวนของเนื้อวัสดุในฝั่งของชิ้นงานจึงลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6(ก-2) และในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.5 มม. ก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อระยะเผื่อเชฟมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเข้มของการไหลวนของเนื้อวัสดุในฝั่งของชิ้นงานก็จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6(ก-3)

เมื่อระยะพันช์สโตรกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) ที่ระยะพันช์สโตรก 1.5 มม ในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.2 มม. และ 0.3 มม. จะมีลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุในชิ้นงานที่คล้ายกัน โดยที่ยังคงมีลักษณะการไหลวนของเนื้อวัสดุภายในชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเผื่อเชฟที่มีขนาดเล็กทำให้ระยะของช่องว่างระหว่างพันช์และดายน้อย ซึ่งทำให้ผลของมุมเอียงเทเปอร์ยังคงมีอยู่ แต่จะค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6(ข-1) และ 6(ข-2) นอกจากนี้ความเข้มของการไหลวนของเนื้อวัสดุจะลดลง เมื่อระยะพันช์สโตรกเพิ่มมากขึ้น สำหรับในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.5 มม. จะพบว่าเมื่อระยะพันช์สโตรกเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการไหลวนของเนื้อวัสดุภายในชิ้นงานก็จะลดลงด้วย เช่นเดียวกันกับในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.2 มม. และ 0.3 มม. แต่เนื่องจากระยะเผื่อเชฟที่มีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างพันช์และดายเพิ่มมากขึ้น จนทำให้อิทธิพลของลักษณะรูปร่างพันช์ที่เอียงเทเปอร์ลดลงจนกระทั่งหมดไป ทำให้การไหลเปลี่ยนเป็นการไหลตัวเข้าหาฝั่งของพันช์ ดังแสดงในรูปที่ 6(ข-3)

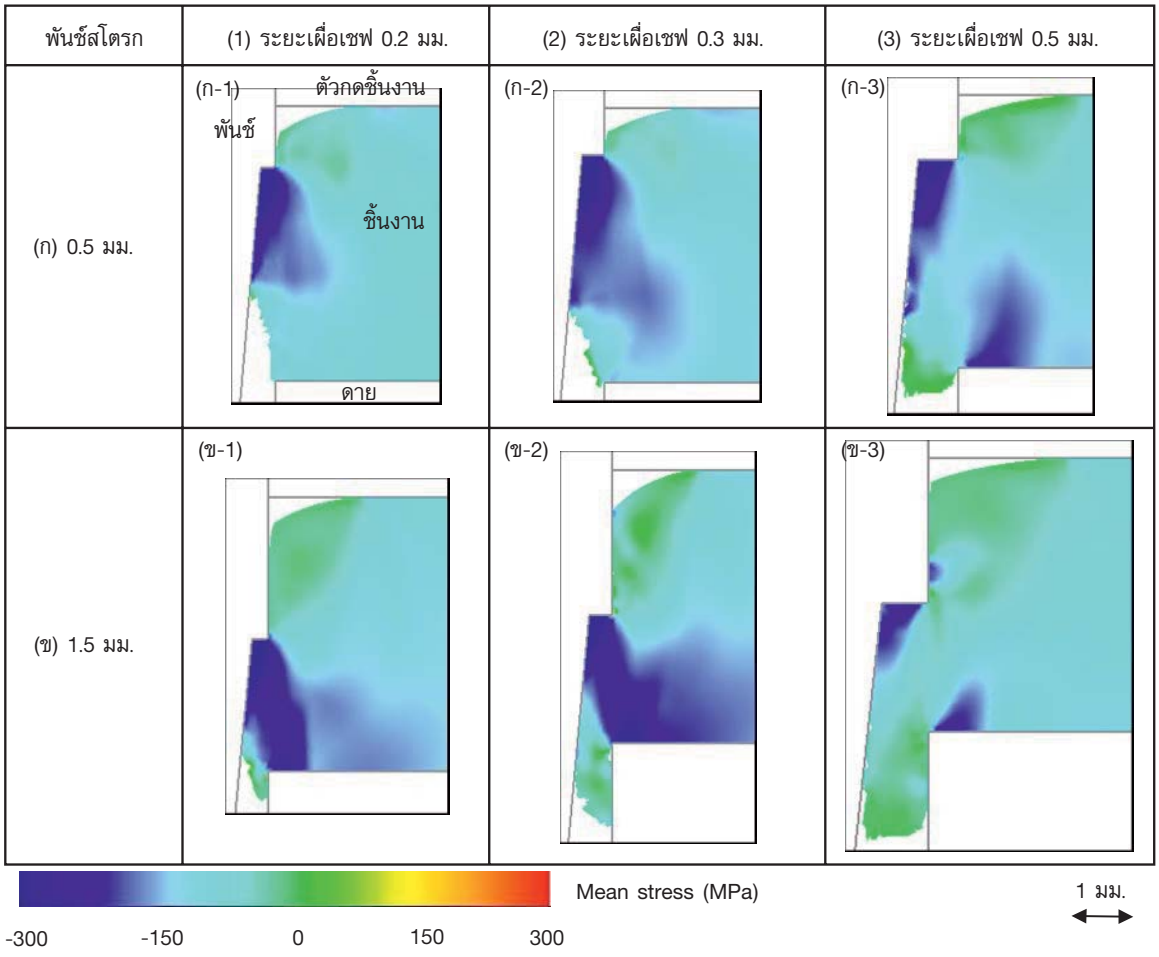


รูปที่ 6 เปรียบเทียบการไหลตัวของเนื้อวัสดุ เมื่อระยะเผื่อเชฟแตกต่างกัน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา)

3.4 เปรียบเทียบการกระจายความเค้นในชิ้นงานในขั้นตอนการตัดเชฟด้วยสเตปเทเปอร์พันช์

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความเค้นในชิ้นงานในขั้นตอนการตัดเชฟด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ จะพบว่าการกระจายความเค้นในชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุ ที่ระยะพันช์สโตรก 0.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 7(ก) ในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.2, 0.3 และ 0.5 มม. จะพบว่าเกิดลักษณะการไหลวนของเนื้อวัสดุในชิ้นงาน ซึ่งการไหลวนนี้จะทำให้เกิดความดันไฮดรอสแตติกและทำให้เกิดความเค้นอัดภายในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นและทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกขาดได้ยากขึ้น [7] โดยที่การไหลวนและความเค้นอัดจะลดลงเมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความเค้นอัดบริเวณขอบคมตัดของพันช์จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 7(ก-1), 7(ก-2) และ 7(ก-3) ตามลำดับ สำหรับบริเวณขอบคมตัดของดายจะสังเกตได้ว่าจะมีความเค้นอัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ระยะเผื่อเชฟที่มีขนาดเล็ก จะทำให้เนื้อของส่วนที่ถูกทำ การตัดเชฟมีปริมาณน้อยซึ่งยังไม่มีส่วนที่เลยพ้นบริเวณปากดายทำให้ยังไม่เกิดผลของความเค้นอัดขึ้นที่บริเวณปากดาย ในขณะที่เมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้นปริมาณเนื้อวัสดุของส่วนที่ถูกตัดเชฟจะมีเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการไหลของเนื้อวัสดุผ่านเข้าไปในปากดายทำให้เกิดความเค้นอัดที่บริเวณขอบคมตัดดายเพิ่มมากขึ้นตามระยะการเผื่อเชฟที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7(ก-1), 7(ก-2) และ 7(ก-3) ตามลำดับ

เมื่อระยะสโตรกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7(ข) ที่ระยะสโตรก 1.5 มม. สำหรับในกรณีของระยะเผื่อเชฟ 0.2 มม. และ 0.3 มม. จะพบว่ายังมีลักษณะการไหลวนของเนื้อวัสดุในชิ้นงานบ้าง ดังนั้นจากผลของการไหลวนของเนื้อวัสดุในชิ้นงานนี้จะทำให้เกิดความเค้นอัดขึ้นภายในเนื้อวัสดุทำให้เกิดการแตกขาดได้ยากดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และความเค้นอัดบริเวณขอบคมตัดพันช์ที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7(ข-1) และ 7(ข-2) สำหรับความเค้นอัดในฝั่งของดายที่เพิ่มมากขึ้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับในกรณีของระยะพันช์สโตรก 0.5 มม. ในขณะที่ระยะเผื่อเชฟ 0.5 มม. การไหลวนของเนื้อวัสดุจะหมดไป รวมทั้งระยะเผื่อเชฟที่มากทำให้ช่องว่างระหว่างพันช์และดายมีขนาดใหญ่ ทำให้การไหลของเนื้อวัสดุในส่วนที่ถูกทำการตัดเชฟเคลื่อนที่ลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพันช์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ความเค้นอัดลดลง และเกิดความเค้นดึงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกขาด ดังแสดงในรูปที่ 7(ข-3)

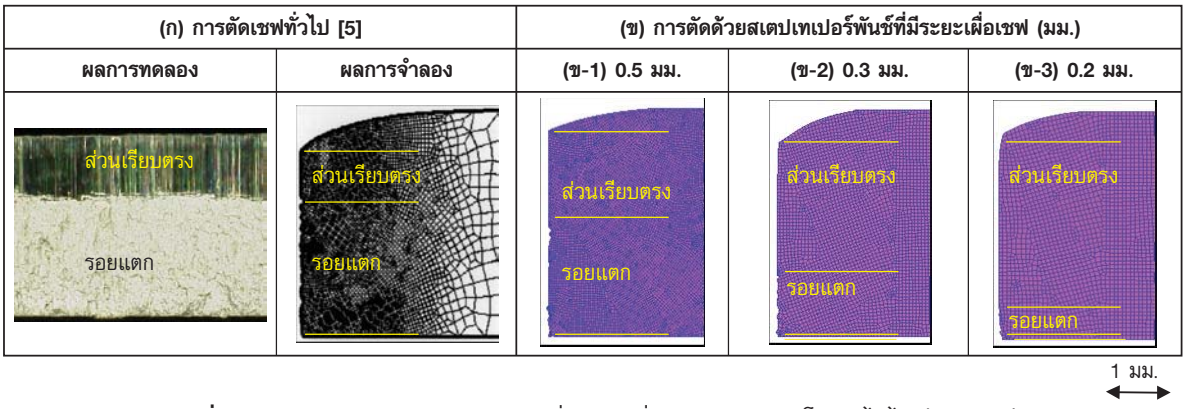


รูปที่ 7 เปรียบเทียบการกระจายความเค้นในเนื้อวัสดุ เมื่อระยะเผื่อเชฟแตกต่างกัน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา)

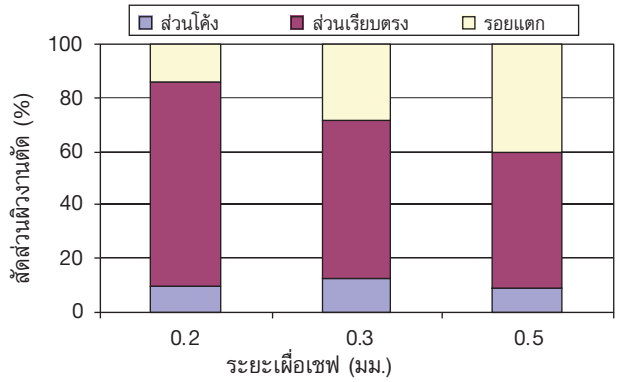
3.5 เปรียบเทียบลักษณะผิวงานตัดที่ได้และความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และลักษณะผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเชฟด้วยสเตปเทเปอร์พันช์

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเชฟด้วยสเตปเทเปอร์พันช์มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา ที่ระยะเผื่อเชฟ 0.2, 0.3 และ 0.5 มม. และเปรียบเทียบกับการตัดเชฟทั่วไปที่ระยะเผื่อเชฟ 0.5 มม. จากที่ได้ทำการอธิบายกลไกและหลักการของกระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 จะได้ว่าผิวงานตัดที่ได้เมื่อระยะเผื่อเชฟ 0.5, 0.3 และ 0.2 มม. เกิดส่วนโค้งมน 0.27, 0.37, 0.28 มม. ส่วนเรียบตรง 1.51, 1.78, 2.30 มม. และรอยแตก 1.22, 0.85, 0.42 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8(ข-1), 8(ข-2) และ 8(ข-3) ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 8(ก) แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองของกระบวนการตัดเชฟทั่วไปที่ระยะเผื่อเชฟ 0.5 มม. จากงานวิจัยในอดีต [2] ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรมในการจำลองกระบวนการตัดและกระบวนการตัดเชฟ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรมในการจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ [2-5] และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ที่มุมเอียง 6 องศา ที่ระยะเผื่อเชฟ 0.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 8(ข-1) จะพบว่าลักษณะผิวงานตัดที่ได้จากกระบวนการตัดด้วย สเตปเทเปอร์พันช์จะให้ผิวงานตัดที่ดีกว่ากระบวนการตัดเชฟทั่วไป โดยที่จะมีส่วนโค้งมนลดลงประมาณร้อยละ 45 ส่วนเรียบตรงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 55 และรอยแตกลดลงประมาณร้อยละ 35 ตามลำดับ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างระยะเผื่อเชฟและลักษณะผิวงานตัดที่ได้ ได้สรุปและแสดงไว้ในรูปที่ 9 จากกราฟจะได้ว่าเมื่อระยะเผื่อเชฟเพิ่มมากขึ้น ส่วนเรียบตรงจะลดลง แต่ส่วนแตกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นระยะเผื่อเชฟที่มีขนาดเล็กจะให้คุณภาพผิวงานตัดที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเผื่อเชฟที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเผื่อเชฟมีขนาดเล็กลง โอกาสการเกิดความเสียหายต่อพันช์ก็จะมีมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเผื่อเชฟที่น้อยจะทำให้เกิดความเค้นอัดที่ขอบคมตัดของพันช์มีมากขึ้นดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดความเสียหายต่อพันช์ได้ง่าย



รูปที่ 8 เปรียบเทียบลักษณะผิวงานตัด เมื่อระยะเผื่อเชฟแตกต่างกันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบกับการตัดเชฟทั่วไป (มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเผื่อเชฟและลักษณะผิวงานตัด โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา)

5. วิจารณ์ผล

การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พันช์จะพบว่า สามารถนำมาอธิบายถึงผลของระยะเผื่อเชฟที่มีต่อกลไกการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พั้นช์โดยทำการอธิบายด้วยลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุและลักษณะการกระจายความเค้นในชิ้นงานระหว่างขั้นตอนการตัด นอกจากนี้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเผื่อเชฟและลักษณะผิวงานตัดที่ได้

6. สรุปผล

จากการทำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างระยะเผื่อเชฟและลักษณะผิวงานตัดที่ได้ในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พั้นช์ดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำมาอธิบายถึงผลของระยะเผื่อเชฟที่มีต่อลักษณะผิวงานตัดที่ได้ โดยอธิบายจากลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุและการกระจายความเค้นในชิ้นงานซึ่งแสดงให้ทราบถึงค่าระยะเผื่อเชฟที่เปลี่ยนไป จะส่งผลก่อให้เกิดลักษณะการไหลวนของเนื้อวัสดุ และส่งผลทำให้ความเค้นอัดภายในเนื้อวัสดุเพิ่มมากขึ้น [7] ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะผิวงานตัดที่ได้

2. จากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่า ระยะเผื่อเชฟที่ลดลงจะมีผลทำให้คุณภาพผิวงานตัดที่ได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามระยะเผื่อเชฟที่มีขนาดเล็กจะทำให้มีโอกาสเกิดความเสียหายขึ้นที่พันช์ได้ง่าย

3. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำนายผิวงานตัดในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันช์ของเงื่อนไขการตัดอื่นได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณสถาบัน ไทย-เยอรมัน ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินวิจัยสำหรับการทำงานวิจัยนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. Stromberger, C., et al, 1965, *Werkstatt Betr.*, Vol. 98-10, 739. (in German)

2. Murakawa, M., Thipprakmas, S., and Jin, M, 2003, “Investigation of the Relationship between Shaved Surface and Shaving Allowance”, *Journal of JSTP.*, Vol. 44-513, pp. 53-57. (in Japanese)

3. Sasahara, H., Tabuchi, H., Jin, M., and Murakawa, M., 2001, “FEM Simulation on Machined Surface Generation in Shaving Process”, *Trans action of the Japanese Society of Mechanical Engineers*”, Vol. 67-654, pp. 251-256, (in Japanese)

4. Thipprakmas, S., Jin, M., and Murakawa, M., 2005, “Finite Element Simulation of Blanked Surface Features in Fine Blanking Process”, *Proceeding 8th ICTP, Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 85-86.

5. Thipprakmas, S., Jin, M., and Murakawa, M., 2006, "Study on Flanged Shapes in Fineblanked-Hole Flanging Process (FB-Hole Flanging Process) using Finite Element Method (FEM)", *Proceeding 7th APCMP, Asia Pacific Conference on Materials Processing*, p. 25.

6. Thipprakmas, S., Jin, M., and Murakawa, M., 2006, "An Investigation of Material Flow Analysis in Fine-Blanking Process", *Proceeding 7th APCMP, Asia Pacific Conference on Materials Processing*, p. 41.

7. Aoki, I. and Takahashi, T., 2003 "Material Flow Analysis on Shearing Process by Applying Fourier Phase Correlation Method-Analysis of Piercing and Fineblanking", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, pp. 45-52.