

ความสัมพันธ์ของมุมเอียงเทเปอร์และผิวงานตัดในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พUNCH โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ¹ สิริพร โรจนนันต์² และ ประวิตร ปรมาภูติ³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 2 เมษายน 2550 ดอรับเมื่อ 26 กันยายน 2550

บทคัดย่อ

กระบวนการตัดเฉือนซึ่งเป็นกระบวนการทำให้วัสดุแยกออกจากกันมาเป็นชิ้นงานผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ คุณภาพของผิวงานตัดที่ได้จะมีความสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์เป็นอย่างยิ่ง หนึ่งในกระบวนการตัดเฉือนที่นำมาใช้เพื่อลดขั้นตอนกระบวนการผลิตคือ กระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พUNCH (Step taper shaped punch) ซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาการผลิตได้ เนื่องจากจะทำการตัดเฉือนและตัดเซฟ (Shaving) ต่อเนื่องกันในหนึ่งสโตรกของการเคลื่อนที่พUNCH ถึงแม้ว่ากระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พUNCH จะได้มีการศึกษามาก่อนแล้วในอดีต แต่เป็นการศึกษาด้วยวิธีการทดลองซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดของขอบเขตการทดลอง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของสเตปเทเปอร์พUNCH และผิวงานตัดที่ได้ยังไม่ได้มีการสรุปไว้ รวมทั้งการอธิบายถึงกลไกการตัดเฉือนและผลที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่สามารถอธิบายโดยหลักการทางทฤษฎีได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และผิวงานตัดที่ได้ รวมทั้งอธิบายถึงกลไกการตัดเฉือนและตัดเซฟ และผลที่เกิดขึ้นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) โดยผลจากการศึกษาพบว่ามุมเอียงเทเปอร์ที่ 2-6 องศา ลักษณะของผิวงานตัดที่ได้จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมุมเอียงเทเปอร์มากกว่า 6 องศา ส่วนเรียบตรงของผิวงานตัดจะลดลง ในขณะที่ส่วนแตกจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถอธิบายได้โดยการไหลตัวของเนื้อวัสดุและการกระจายความเค้นในเนื้อวัสดุ ดังนั้นมุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสมจะประมาณ 6 องศาซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาโดยวิธีการทดลองจากงานวิจัยในอดีต ดังนั้นจากผลการศึกษาจะทำการสรุปได้ว่าวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำมาอธิบายถึงกลไกการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พUNCH และแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และผิวงานตัดได้

1 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

2 อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

3 วิศวกร บริษัท ศรีสทวัฒน์กิจ จำกัด

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

Sutasn Thipprakmas¹, Siriporn Rojananan², and Pravitr Paramaphuti³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Received 2 April 2007 ; accepted 26 September 2007

Abstract

The shearing process is applied to separate the sheet metal into product and scrap and then the cut surface indicates the quality of product. One of the shearing processes used to reduce the number of process is the shearing by step taper shaped punch. This method can reduce the number of processes by including the shearing and shaving processes into one single stroke of punch. Although this method was studied in the past, it was done by experiments. Therefore, the relationship between taper angle and cut surface is not investigated and the shearing mechanism can not be theoretically clarified. In this study, the relationship between the taper angle and the cut surface was investigated. Furthermore, the shearing mechanism was also investigated and theoretically clarified by using the finite element method (FEM). As a result, in the case of 2-6 degree taper angle, there are no significant on the cut surface. On the other hand, in the case of the taper angle larger than 6 degree, the smooth cut surface decreases and the cracks increase. Therefore, the optimal taper angle is approximately 6 degree which is agreed with the past research. From the results, they indicated that the shearing mechanism and the relationship between taper angle and cut surface can be theoretically clarified by using FEM.

¹ Lecturer, Department of Tool and Materials Engineering.

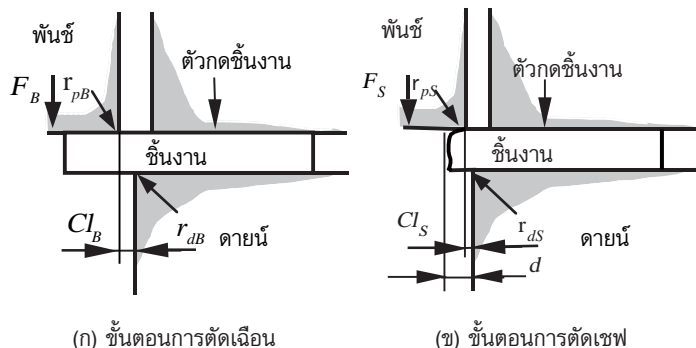
² Lecturer, Division of Materials Technology, School of Energy Environment and Materials.

³ Engineer, Srisahawattanakij Inc.

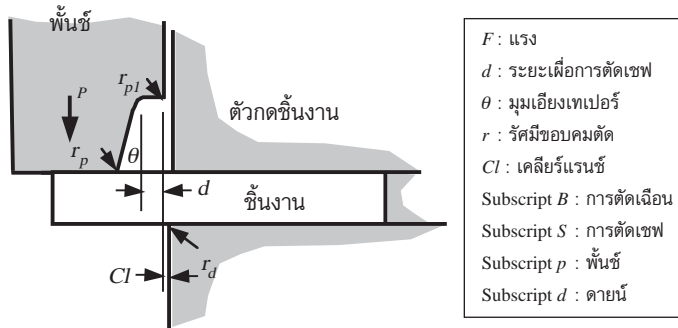
1. บทนำ

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ได้มีการแข่งขันกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้คุณภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น และต้นทุนการผลิตที่ลดลง ดังนั้นจึงได้มีการทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกันอย่างต่อเนื่อง [1-2] สำหรับกระบวนการตัดเฉือนโลหะซึ่งเป็นการขึ้นรูปที่มีความสำคัญเพราะเป็นการทำให้วัสดุเกิดการตัดขาดมาเป็นชิ้นงานผลิตภัณฑ์ ซึ่งคุณภาพของผิวงานตัดที่ได้ก็จะมีผลกระทบต่อตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วผิวงานตัดของชิ้นงานที่ดีควรมีส่วนเรียบตรงที่มาก และไม่มีส่วนแตกหรือมีส่วนแตกเพียงเล็กน้อย ซึ่งการได้มาของคุณภาพผิวงานตัดที่ดีดังกล่าวข้างต้นค่อนข้างทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการนำเอาชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนไปผ่านกระบวนการที่สอง เช่น กระบวนการแมชชีน ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้น สำหรับในปัจจุบันกระบวนการตัดที่สามารถผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพผิวที่ดีคือ กระบวนการตัดไฟไนต์แบลนด์ และกระบวนการตัดเซฟ แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองกระบวนการยังมีข้อจำกัด เช่น กระบวนการตัดไฟไนต์แบลนด์ต้องมีการใช้เครื่องเพรสไฟไนต์แบลนด์โดยเฉพาะ รวมทั้งการทำแม่พิมพ์ซึ่งต้องการความเที่ยงตรงสูง และสำหรับกระบวนการตัดเซฟต้องทำการตัดเฉือนครั้งหนึ่งก่อนที่จะมาทำการตัดเซฟ ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นทำให้ขั้นตอนการผลิตเพิ่มมากขึ้นรวมทั้งความสัมพัทธ์ของตัวแปรของการตัดเฉือนครั้งหนึ่ง และการตัดเซฟครั้งหนึ่งซึ่งก็มีผลโดยตรงต่อผิวงานตัด ดังนั้นจึงได้มีการ

ออกแบบพื้นที่โดยรวมเอาขั้นตอนของการตัดเฉือน และ ขั้นตอนของการตัดเซฟเข้าด้วยกัน โดยการทำพื้นที่มีลักษณะเป็นขั้นและมีมุมเอียงเทเปอร์ [3-4] ซึ่งจะเรียกลักษณะพื้นที่ดังกล่าวว่า สเตปเทเปอร์พื้นที่ และจากลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถลดขั้นตอนลงได้ กล่าวคือ จะเป็นการตัดเฉือนและตัดเซฟ ในการเคลื่อนที่พื้นที่หนึ่งสโตรก ดังแสดงในรูปที่ 2 แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สเตปเทเปอร์พื้นที่ดังกล่าว ยังมีความยุ่งยากของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพของผิวชิ้นงานตัด เช่น มุมเอียงเทเปอร์ และระยะเพื่อการตัดเซฟเป็นต้น ถึงแม้ว่ากระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พื้นที่ จะได้มีการศึกษามาบ้างแล้วในอดีต แต่เป็นการศึกษาด้วยวิธีการทดลองซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดของขอบเขตการทดลอง ดังนั้น ความสัมพันธ์ ระหว่างรูปร่างของสเตปเทเปอร์พื้นที่ และผิวงานตัดที่ได้ยังไม่ได้มีการสรุปไว้รวมทั้งการอธิบายถึงกลไกการตัดเฉือน และผลที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่สามารถอธิบายโดยหลักการทางทฤษฎีได้ ทำให้สเตปเทเปอร์พื้นที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของมุมเอียงเทเปอร์และผิวงานตัดในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พื้นที่โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดขั้นตอนของการลองผิดลองถูกลงได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุ และการกระจายความเค้นในชิ้นงานในระหว่างกระบวนการตัดได้อีกด้วย ซึ่งความถูกต้องเที่ยงตรงของการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับในกระบวนการตัดเฉือน และตัดเซฟก็ได้มีการทำการศึกษาและทำการยืนยันถึงผลการจำลองที่ถูกต้องจากงานวิจัยในอดีตเป็นจำนวนมาก [5-11]



รูปที่ 1 กระบวนการตัดเฉือนและตัดเซฟโดยทั่วไป



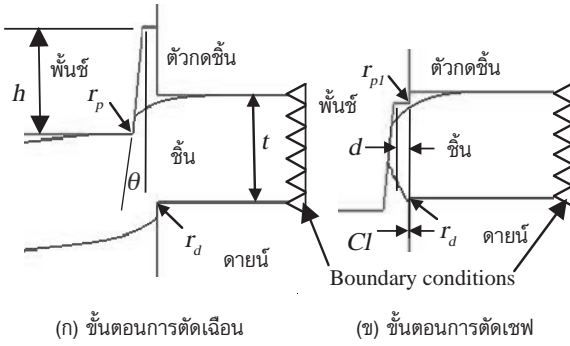
รูปที่ 2 กระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พิ้นซ์

โดยผลจากการศึกษาของงานวิจัยนี้ พบว่ามุมเอียงเทเปอร์ที่ 2-6 องศา ลักษณะของผิวงานตัดที่ได้จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมุมเอียงเทเปอร์มากกว่า 6 องศา ส่วนเรียบตรงของผิวงานตัดจะลดลง ในขณะที่ส่วนแตกจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถอธิบายได้โดยลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุ และการกระจายความเค้นในเนื้อวัสดุ ดังนั้นมุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสมจะประมาณ 6 องศา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจากงานวิจัยในอดีตโดยวิธีการทดลอง [3] ดังนั้นจากผลการศึกษาจะทำการสรุปได้ว่าวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาอธิบายถึงกลไกการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พิ้นซ์ และแสดงถึงความสัมพันธ์ของมุมเอียงเทเปอร์และผิวงานตัดรวมทั้งมุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาและต้นทุนสำหรับการลองผิดลองถูกโดยกระบวนการทดลองได้

2. วิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พิ้นซ์สำหรับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยในงานวิจัยนี้ใช้การจำลองแบบ 2 มิติ ความเครียดระนาบ เพื่อที่สามารถทำการเปรียบเทียบผลกับกระบวนการตัดเฉพทั่วไปที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว [5] และใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ DEFORM-2D โดยวัสดุชิ้นงานที่จะทำการตัดเป็นอลูมิเนียม AI1100-O (มาตรฐาน JIS) ขนาดความหนา

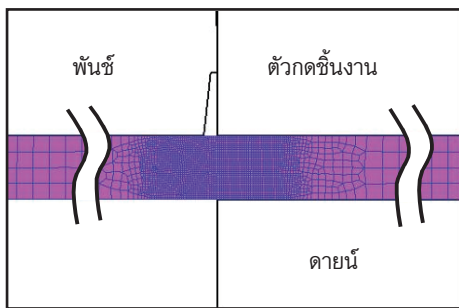
3 มม. โดยมีการกำหนดสภาวะขอบ (Boundary conditions) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่สมการคอนสติดูที่ฟรีของวัสดุได้มาจากการทำการทดสอบแรงดึงโดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยในอดีต [5] โดยชิ้นงานจะถูกกำหนดให้เป็นวัสดุอิลาสติก-พลาสติก สำหรับพิ้นซ์ ดายน์ และตัวกดชิ้นงานจะถูกกำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็ง เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ และกำหนดเงื่อนไขของแรงเสียดทานเป็นแบบคูลอมบ์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.1 [5] ดังแสดงในตารางที่ 1 ในการศึกษาที่กำหนดรูปแบบของอิลิเมนต์เป็นสี่เหลี่ยมและมีจำนวนประมาณ 3,000 อิลิเมนต์ นอกจากนี้ยังได้ทำการกำหนดให้บริเวณการตัดเฉือนมีความละเอียดของอิลิเมนต์มาก ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ถูกต้องมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 และได้ทำการกำหนดให้มีการทำการปรับอิลิเมนต์ใหม่ (Adaptive remeshing) ทุกๆ 3 สเตป เพื่อป้องกันการลู่ออก (Divergence) ระหว่างการคำนวณ โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาที่มุมเอียงเทเปอร์ 2, 4, 6 และ 10 องศา และระยะเพื่อการตัดเฉพ 0.5 มม. ความสูงของส่วนที่เป็นเทเปอร์เท่ากับ (h) 3 มม. ซึ่งเท่ากับความหนาของชิ้นงาน และค่าเคลียร์เรนซ์ของขั้นตอนการตัดเฉพเท่ากับร้อยละ 0 ความหนาชิ้นงาน สำหรับสมการการแตกหักจะใช้สมการของ Normalized Cockroft & Latham [12] ดังแสดงในสมการที่ (1) โดยที่ค่าการแตกหักวิกฤต (Critical Value Factor) คือ 0.98 โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยในอดีต [5]



รูปที่ 3 โมเดลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

$$C = \int \left[\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right] d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

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



รูปที่ 4 การสร้างเอลิเมนต์ในโมเดล การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

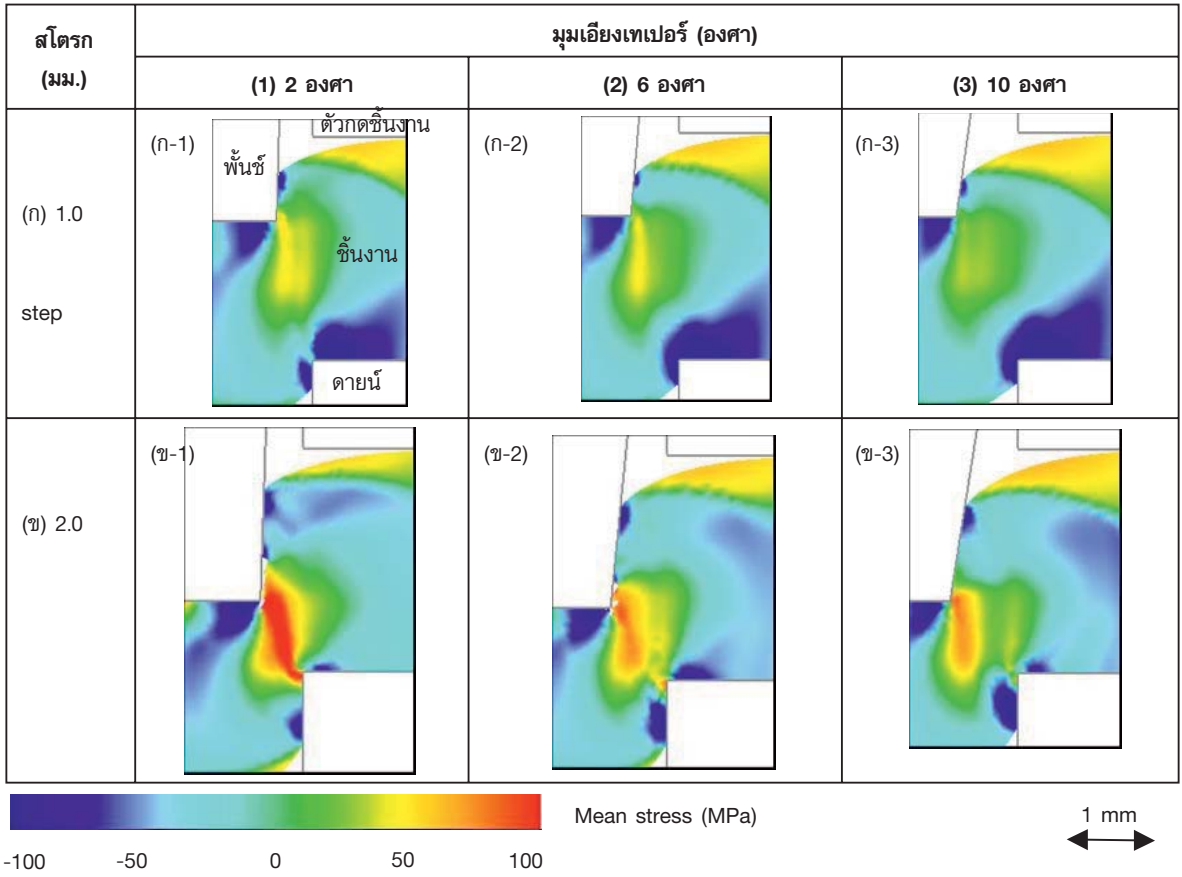
3. ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวิเคราะห์ผล

3.1 เปรียบเทียบการกระจายความเค้นในชิ้นงาน ของขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์ พUNCH

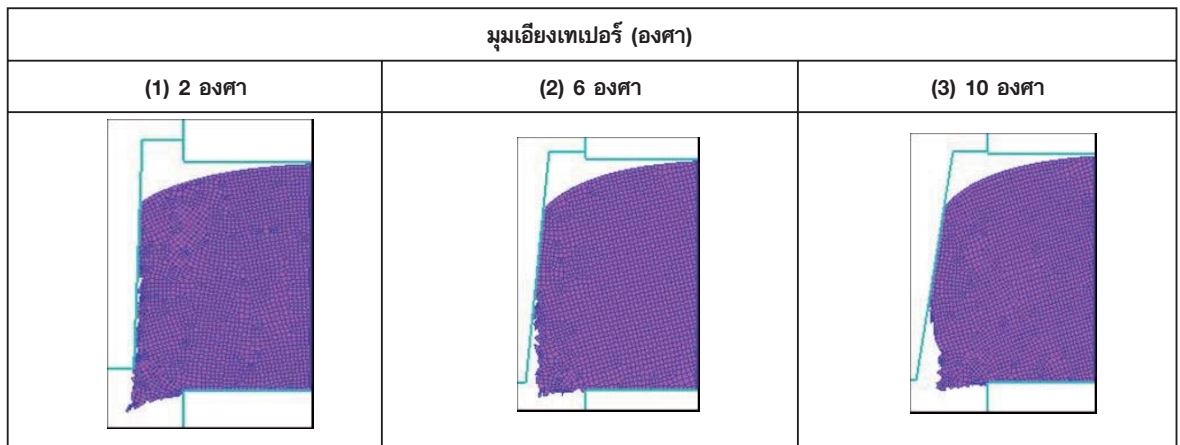
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานของขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พUNCH ที่มุมเอียงเทเปอร์ต่างๆกัน กรณีของระยะพUNCHสโตรก 1.0 มม. จะได้ว่าลักษณะการกระจายความเค้นในชิ้นงานจะมีลักษณะคล้ายกันในทุกกรณีของมุมเอียงเทเปอร์ โดยที่จะเกิดความเค้นดึงขึ้นบริเวณขอบคมตัด และทิศทางของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางจากขอบคมตัดของพUNCHไปยังขอบคมตัดของดายน์ โดยที่ค่าความเค้นดึงจะมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5(ก-1), 5(ก-2) และ 5(ก-3) ตามลำดับ และเมื่อระยะพUNCHสโตรกเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5(ข) ที่ระยะพUNCHสโตรก 2.0 มม. จะได้ว่าความเค้นดึงบริเวณขอบคมตัดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อมุมเอียงเทเปอร์เพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นดึงจะมีค่าลดลง ทั้งนี้ผลของมุมเอียงเทเปอร์ที่มีต่อการกระจายความเค้นในเนื้อวัสดุสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อมุมเอียงเทเปอร์เพิ่มมากขึ้นทำให้ช่องว่างระหว่างพUNCHและดายน์มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุเป็นไปได้ง่ายขึ้นจึงทำให้ความเค้นดึงในบริเวณแนวการตัดเฉือนมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5(ข-1), 5(ข-2) และ 5(ข-3) นอกจากนี้แนวการตัดเฉือนจะเคลื่อนออกจากแนวของขอบคมตัดพUNCHและดายน์เมื่อมุมเอียงเทเปอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5(ข-2) และ 5(ข-3)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Simulation model	2D-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	$\bar{\sigma} = 160.4\bar{\epsilon}^{0.22}$
Tool cutting radius	$r_p, r_{p1}, r_d : 0.01 \text{ mm}$
Taper angle (θ)	2, 4, 6, 10°
Shaving allowance (d)	0.5 mm
Fracture criterion equation	Normalized Cockroft & Latham
Critical fracture value (C)	0.98
Friction coefficient (μ)	0.1



รูปที่ 5 การกระจายความเค้นในเนื้อวัสดุของขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์ฟันซ์ โดยการจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ (ระยะเฟือเซพ (d) 0.5 มม.)



รูปที่ 6 ลักษณะผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์ฟันซ์ โดยการจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ (ระยะเฟือเซพ (d) 0.5 มม.)

1 mm

3.2 เปรียบเทียบผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันธ์

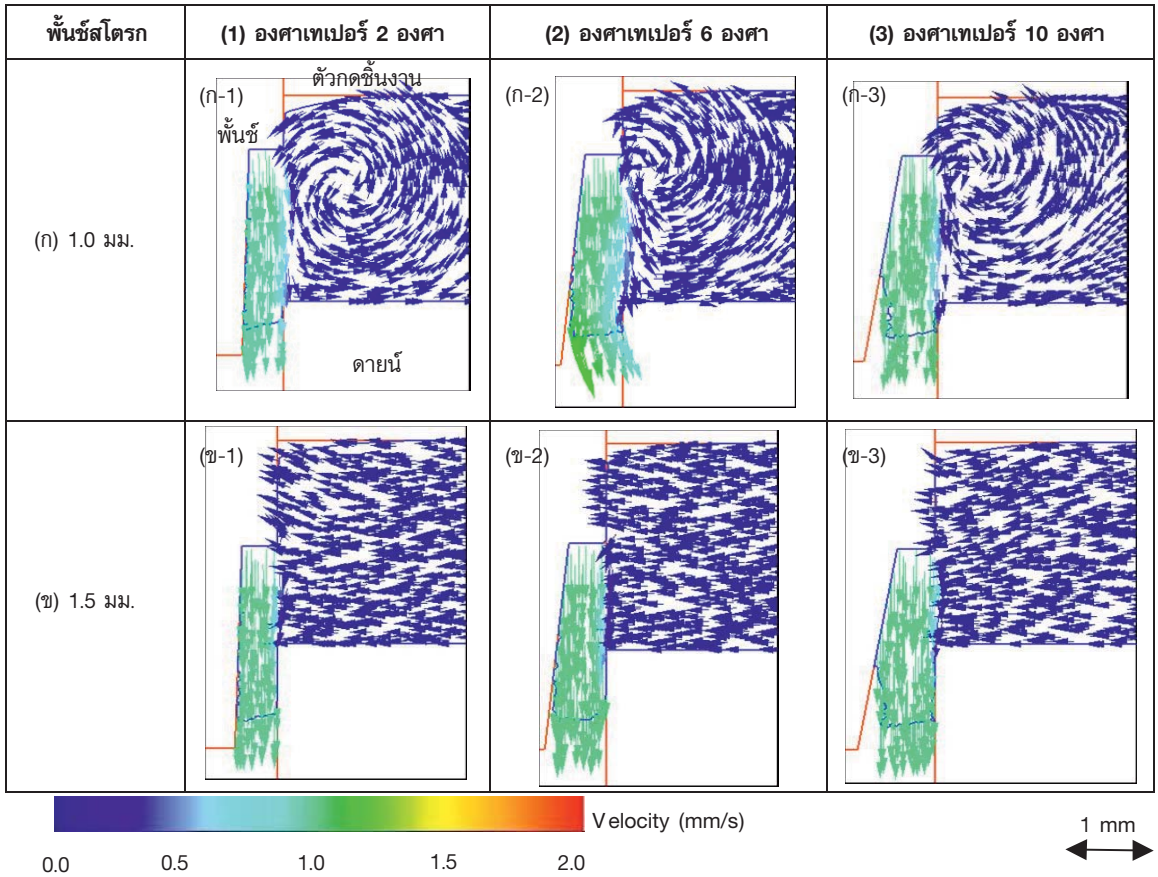
รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผิวงานตัดที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์พันธ์ จากผลการจำลองจะได้ว่าลักษณะความได้ฉากของขอบผิวงานตัดจะสูญเสียความได้ฉากมากขึ้น และส่วนโค้งมนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการแตกขาดที่ได้ของทุกกรณีจะมีลักษณะเป็นการยึดจนฉีกขาดทั้งนี้เนื่องจากระยะเพื่อเซฟที่มากส่งผลทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุเป็นไปได้ง่ายทำให้การแตกขาดจนชิ้นงานแยกออกจากกันเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้เกิดเป็นลักษณะการยึดจนฉีกขาด

3.3 เปรียบเทียบการไหลตัวของเนื้อวัสดุของขั้นตอนการตัดเฉพด้วยสเตปเทเปอร์พันธ์

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการไหลตัวของเนื้อวัสดุในขั้นตอนการตัดเฉพด้วยสเตปเทเปอร์พันธ์ที่มุมเอียงเทเปอร์ที่แตกต่างกัน ในกรณีระยะพันธ์สโตรก 1.0 มม. ดังแสดงในรูปที่ 7(ก) ที่มุมเอียงเทเปอร์ 2 องศา จะได้ว่า การไหลตัวของเนื้อวัสดุในส่วนที่ถูกตัดเฉพจะถูกพันซ์กดลง แต่เนื่องจากลักษณะรูปร่างพันธ์มีลักษณะเป็นเทเปอร์ ดังนั้นการไหลตัวของเนื้อวัสดุในส่วนนี้จะมีทิศทางการเคลื่อนที่เป็นแนวเอียงเข้าไปในส่วนของชิ้นงาน ทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุในด้านของชิ้นงานซึ่งปกติจะมีทิศทางการเคลื่อนที่มาจากฝั่งของพันธ์ถูกตัดเฉพ ทำให้เนื้อวัสดุใน ฝั่ง

ของชิ้นงานไหลตัวไปในทิศทางกลับเข้าฝั่งของชิ้นงาน ดังนั้นจะทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุภายในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 7(ก-1) สำหรับในกรณีของมุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา และ 10 องศา จะได้ลักษณะการไหลตัวที่คล้ายกับในกรณีของมุมเอียงเทเปอร์ 2 องศา แต่เนื่องจากเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ระยะห่างระหว่างพันธ์และดาบมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุในส่วนที่ถูกตัดเฉพเคลื่อนที่ลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพันธ์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นส่วนที่จะไหลตัวเข้ามาในฝั่งของชิ้นงานก็จะมีขนาดลดลง ทำให้ความเข้มของแนวการขวางการเคลื่อนที่ของฝั่งชิ้นงานลดลง แต่อย่างไรก็ตามการไหลของเนื้อวัสดุในฝั่งชิ้นงานที่เคลื่อนที่มาพบแนวการขวางการเคลื่อนที่ก็จะทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุ ซึ่งการไหลวนนี้จะมีผลลดลงเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7(ก-1), 7(ก-2) และ 7(ก-3) ตามลำดับ

เมื่อระยะพันธ์สโตรกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7(ข) ที่ระยะพันธ์สโตรก 1.5 มม. จะพบว่าลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุจะเหมือนกันทั้ง 3 กรณีของมุมเอียงเทเปอร์ กล่าวคือ ส่วนที่ถูกตัดเฉพจะมีทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพันธ์ โดยจะสังเกตได้ว่าความเร็วจะเพิ่มมากขึ้นตามขนาดที่ใหญ่ขึ้นของมุมเอียงเทเปอร์ และการไหลตัวของเนื้อวัสดุในฝั่งของชิ้นงานจะมีทิศทางเข้าหาฝั่งพันธ์ไปจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 7(ข-1), 7(ข-2) และ 7(ข-3) ตามลำดับ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบการไหลตัวของเนื้อวัสดุเมื่อมุมเอียงเทเปอร์แตกต่างกัน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ระยะเพื่อเซพ (d) 0.5 มม.)

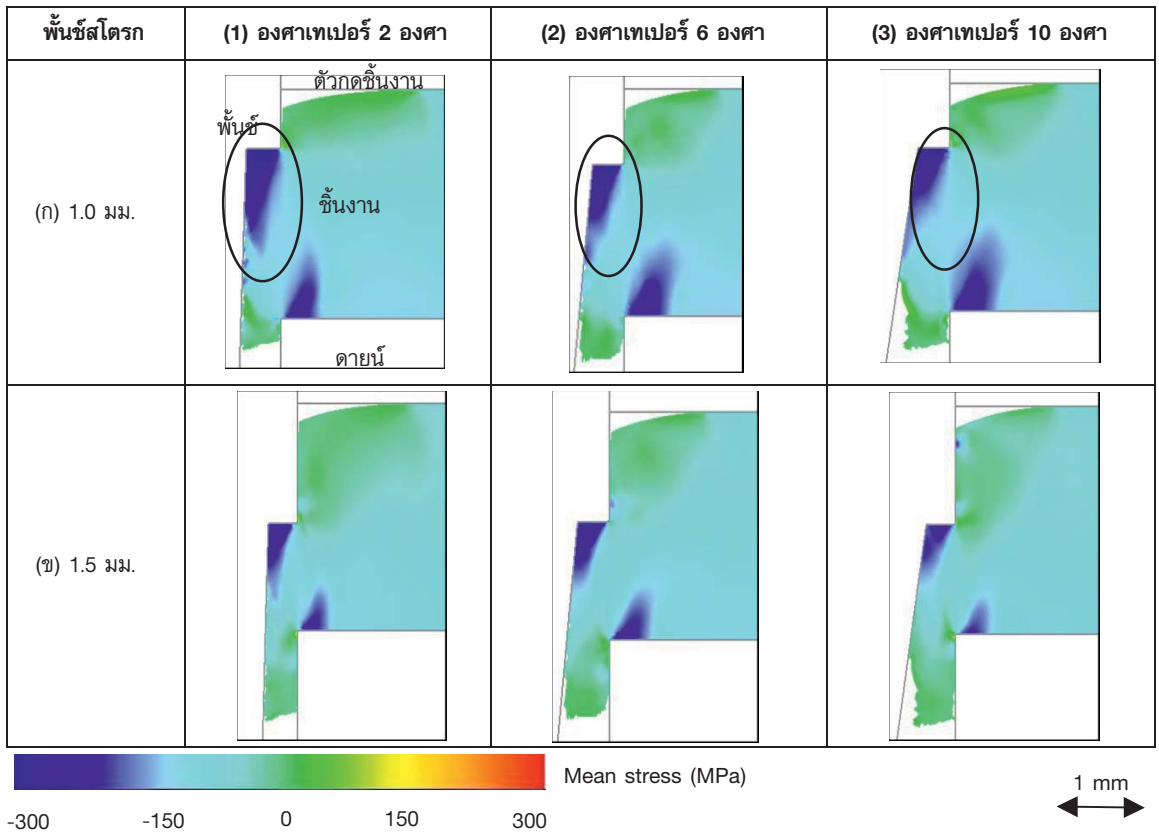
3.4 เปรียบเทียบการกระจายความเค้นในชิ้นงานของขั้นตอนการตัดเซพด้วยสเตปเทเปอร์พินซ์

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความเค้นในชิ้นงานของขั้นตอนการตัดเซพด้วยสเตปเทเปอร์พินซ์ จะพบว่าการกระจายความเค้นในชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุ ที่ระยะพินซ์โตรก 1.0 มม. กรณีมุมเอียงเทเปอร์ที่มีขนาดเล็กทำให้ระยะห่างระหว่างพินซ์และดายน์มีขนาดเล็กตามไปด้วย ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความเค้นอัดที่มีค่ามากขึ้นบริเวณของขอบคมตัดพินซ์ด้านล่างเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของมุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา และ 10 องศาดังที่ได้แสดงไว้ในบริเวณวงกลมในรูปที่ 8(ก-1), 8(ก-2) และ 8(ก-3) ตามลำดับ นอกจากนี้ลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่มี

ลักษณะเกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุจะก่อให้เกิดความดันไฮดรอสแตติก ซึ่งทำให้เกิดความเค้นอัดเพิ่มมากขึ้นในเนื้อวัสดุ [13] ซึ่งพบว่าในกรณีมุมเอียงเทเปอร์ที่เล็กกว่า จะเกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุที่มีความเข้มมากกว่าดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และจากลักษณะการไหลวนของเนื้อวัสดุดังกล่าวก็ทำให้เกิดความเค้นอัดในเนื้อวัสดุที่ต่างกัน โดยที่ความเค้นอัดภายในเนื้อวัสดุจะลดลงเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8(ก-1), 8(ก-2) และ 8(ก-3) ตามลำดับ และเมื่อระยะพินซ์โตรกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูป 8(ข) ที่ระยะพินซ์โตรก 1.5 มม. จากลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่เปลี่ยนจากการไหลวนมาเป็นการไหลเข้าหาฝั่งพินซ์ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ทำให้ความเค้นอัดภายในชิ้นงานลดลง สำหรับในฝั่งของส่วนที่ถูกตัดเซพจะมีลักษณะการกระจาย

ความเค้นเหมือนเดิมคือ จะเกิดความเค้นอัดมากที่บริเวณที่ถูกกดตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพันธซ์ และจะมีความเค้นดึงมากขึ้นที่บริเวณขอบคมตัด โดยที่ความเค้นอัดจะลดลง สำหรับความเค้นดึงจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมเอียงเทเปอร์เพิ่มมากขึ้นและเป็นเช่นนี้ไปจนกระทั่งขึ้น

งานเกิดการแตกขาด ดังแสดงในรูปที่ 8(ข-1), 8(ข-2) และ 8(ข-3) ทั้งนี้เนื่องจากมุมเอียงเทเปอร์ที่ใหญ่จะทำให้ระยะห่างระหว่างพันธซ์และตายน์ใหญ่ขึ้นส่งผลทำให้การไหลของเนื้อวัสดุของส่วนที่ถูกตัดเซฟเคลื่อนที่ลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพันธซ์ได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการกระจายความเค้นในเนื้อวัสดุ เมื่อมุมเอียงเทเปอร์แตกต่างกัน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ระยะเผื่อเซฟ d) 0.5 มม.)

3.5 เปรียบเทียบผิวงานตัดที่ได้และความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และลักษณะผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเซฟด้วยสเตปเทเปอร์พันธซ์


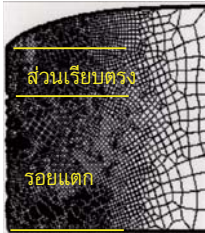



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผิวงานตัดที่ได้จากขั้นตอนการตัดเซฟด้วยสเตปเทเปอร์พันธซ์โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบกับกระบวนการตัดเซฟทั่วไป ดังที่ได้ทำการอธิบายถึงกลไกและหลักการของ

กระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พันธซ์ในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 แล้วนั้น จะได้ว่าผิวงานตัดที่ได้จากมุมเอียงเทเปอร์ 2, 6 และ 10 องศา เกิดส่วนโค้งมน 0.26, 0.27, 0.30 มม. ส่วนเรียบตรง 1.55, 1.51, 1.26 มม. และรอยแตก 1.19, 1.22, 1.44 มม. ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และลักษณะผิวงานตัดที่ได้ ได้ถูกสรุปและแสดงไว้ในรูปที่ 10 ซึ่งจากผลที่ได้จากการจำลองนี้จะได้ว่ามุมเอียงเทเปอร์ที่มีขนาดเล็กจะให้คุณลักษณะผิวที่มีส่วน

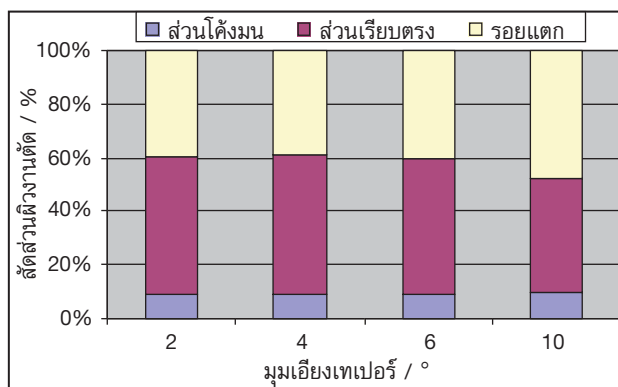
เรียบตรงมาก และรอยแตกน้อย แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการจำลองจะพบว่าที่มุมเอียง 2-6 องศา จะให้ลักษณะของผิวงานตัดที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มากกว่า 6 องศา ส่วนเรียบตรงจะลดลงในขณะที่รอยแตกจะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นมุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสมจะมีค่าประมาณ 6 องศา ทั้งนี้เนื่องจากที่มุมเอียงเทเปอร์ที่น้อยจะทำให้เกิดความเค้นอัดที่พื้นผิวมากดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่ได้ง่าย ดังนั้นจากผลที่ได้จากการจำลองนี้จะได้ว่ามุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสมคือประมาณ 6 องศา ซึ่งก็ให้ผลสอดคล้องกับผลจากงานวิจัยในอดีตที่ได้มีการทำโดยการทดลอง [3]

นอกจากนี้จากงานวิจัยในอดีต [5] ดังแสดงในรูปที่ 9(ก) ซึ่งแสดงผลของการจำลองกระบวนการตัดเซฟทั่วไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากผลที่ได้ทั้งผลการ

ทดลองและผลการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรมในการจำลองกระบวนการตัดและกระบวนการตัดเซฟ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรมในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ [5-10] สำหรับในงานวิจัยนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พื้นที่กับการตัดเฉือนและตัดเซฟทั่วไปจากงานวิจัยในอดีต[5] จะพบว่าลักษณะผิวงานตัดที่ได้จากกระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์พื้นที่ที่มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา จะให้ผิวงานตัดที่ดีกว่ากระบวนการตัดและตัดเซฟ โดยที่จะมีส่วนโค้งมนลดลงประมาณร้อยละ 45 ส่วนเรียบตรงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 55 และรอยแตกลดลงประมาณร้อยละ 35 ตามลำดับ

การตัดเซฟทั่วไป [5]		การตัดด้วยสเตปเทเปอร์พื้นที่ที่มีมุมเอียงเทเปอร์ (องศา)		
ผลการทดลอง	ผลการจำลอง	(1) 2 องศา	(2) 6 องศา	(3) 10 องศา
				

รูปที่ 9 เปรียบเทียบลักษณะผิวงานตัด เมื่อมุมเอียงเทเปอร์แตกต่างกันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบกับ การตัดเซฟทั่วไป (ระยะเพื่อเซฟ (d) 0.5 มม.)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และลักษณะผิวงานตัด โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ระยะเพื่อเซฟ (d) 0.5 มม.)

5. วิจารณ์ผล

จากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์ จะพบว่า ลักษณะการกระจายความเค้นในชิ้นงาน ของขั้นตอนการตัดนั้น จะเหมือนกับการตัดเฉือนโดยทั่วไปคือ แนวการตัดเฉือนจะมีแนวจากขอบคมตัดของฟ้านซ์ไปยังขอบคมตัดของดาบ์ ซึ่งก็สอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี [8] แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมุมเอียงเทเปอร์เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้แนวการตัดเฉือนเคลื่อนออกจากแนวขอบคมตัดของฟ้านซ์และดาบ์ สำหรับในขั้นตอนของการตัดเฉพจะได้ว่า ลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุซึ่งส่งผลต่อการกระจายความเค้นในชิ้นงานสามารถนำมาอธิบายกลไกการตัดโดยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์โดยลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่มีลักษณะเกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุจะก่อให้เกิดความดันไฮดรอสแตติก ซึ่งทำให้เกิดความเค้นอัดเพิ่มมากขึ้นในเนื้อวัสดุที่ต่างกัน โดยที่ความเค้นอัดภายในเนื้อวัสดุจะลดลงเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้มุมเอียงเทเปอร์ที่มีขนาดเล็กจะให้คุณลักษณะผิวที่มีส่วนเรียบตรงมาก และรอยแตกน้อย และเมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการตัดด้วยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์กับการตัดเฉือนและตัดเฉพทั่วไปจากงานวิจัยในอดีต [5] จะพบว่าลักษณะผิวงานตัดที่ได้จากกระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์ที่มุมเอียงเทเปอร์ 6 องศา จะให้ผิวงานตัดที่ดีขึ้น นอกจากนี้ผลการจำลองแสดงให้เห็นทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และลักษณะผิวงานตัดได้ โดยที่มุมเอียง 2-6 องศา จะให้ลักษณะของผิวงานตัดที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อมุมเอียงเทเปอร์มากกว่า 6 องศา ส่วนเรียบตรงจะลดลงในขณะที่รอยแตกจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่า การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการตัดด้วยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์ได้

6. สรุปผล

การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทเปอร์และลักษณะผิวงานตัดที่ได้ในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำมาอธิบายถึงหลักการและกลไกของการตัดเฉือนโดยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์ได้ โดยการอธิบายจากการไหลตัวของเนื้อวัสดุและการกระจายความเค้นในชิ้นงาน ซึ่งแสดงให้เห็นทราบถึงมุมเอียงเทเปอร์ที่เปลี่ยนไปจะส่งผลก่อให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุ และส่งผลทำให้ความเค้นอัดภายในเนื้อวัสดุเพิ่มมากขึ้น [13] ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะผิวงานตัดที่ได้

2. จากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่า มุมเอียงเทเปอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์นั้นจะมีค่าประมาณ 6 องศา ซึ่งสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการวิจัยในอดีตที่ทำการทดลอง [3]

3. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำนายผิวงานตัดในกระบวนการตัดเฉือนด้วยสเตปเทเปอร์ฟ้านซ์ของเงื่อนไขการตัดอื่นได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณสถาบัน ไทย-เยอรมัน ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินวิจัยสำหรับการทำงานวิจัยนี้ ไว้ ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. E. Bayraktar, N. Isac, G. Arnold, An experimental study on the forming parameters of deep-drawable steel sheets in automotive industry, *J. Mater. Process. Technol.* 162-163(2005) 471-476.
2. S. Thipprakmas, M. Jin, M. Murakawa, 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*, (2006) 25.
3. C. Stromberger, et al, *Werkstatt Betr.*, 98-10(1965) 739. (in German)
4. T. Nakagawa, K. Yoshida, Cut-Off punching process -A new method for recovery of stretchability of sheared edge-, *Journal of JSTP.* 10-104(1969) 665-671. (in Japanese)

5. M. Murakawa, S. Thipprakmas, M. Jin, Investigation of The Relationship Between Shaved Surface and Shaving Allowance, *Journal of JSTP.*, p.53-57, 44-513(2003) (in Japanese)
6. H. Sasahara, H. Tabuchi, m. Jin, M. Murakawa, FEM Simulation on Machined Surface Generation in Shaving Process, *Trans. of the Japanese Society of Mechanical Engineers.*, p.251-256, 67-654(2001) (in Japanese)
7. S. Thipprakmas, M. Jin, M. Murakawa, An investigation of material flow analysis in fine-blanking process, *Proceeding 7th APCMP, Asia Pacific Conference on Materials Processing.* (2006) 41.
8. S. Thipprakmas, M. Jin, M. Murakawa, Finite element simulation of blanked surface features in fine blanking process, *Proceeding 8th ICTP, Advanced Technology of Plasticity.* 1(2005) 85-86.
9. Taupin, E., Breitling, J., Wu, W. and Altan, T., Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments, *J. Mater. Process. Technol.*, 59(1996), 68-78.
10. Jeong, S.H., Kang, J.J. and Oh, S.I., A study on shearing mechanism by FEM simulation, *Proceeding 6th ICTP, Advanced Technology of Plasticity.* (1999), 631-634.
11. สุทัศน์ ทิพย์ปรัภมาศ, ลีริพร โรจนนันต์, ประวิตร พรมาภูติ, ความสัมพันธ์ของระยะเพื่อเซฟและผิวงานตัดเฉือนด้วยสเตปเพอร์ฟันซ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 30 ฉบับที่ 3.* (2550)
12. Cockroft, G. & Latham D.J., Ductility and the Workability of Metals, *Journal of the institute of metals.* 96 (1968), 33-39.
13. Aoki I., Takahashi T., 2003, "Material flow analysis on shearing process by applying Fourier phase correlation method -Analysis of piercing and fineblankig-" *Journal of Materials Processing Technology.* Vol.134, pp.45-52.