รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนากระบวนการตัดเรียบเพื่อเพิ่มคุณภาพความเที่ยงตรงผิวงานตัด

โดย นาย สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ

14 มิถุนายน 2555

สัญญาเลขที่ MRG5380117

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนากระบวนการตัดเรียบเพื่อเพิ่มคุณภาพความเที่ยงตรงผิวงานตัด

นาย สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5380117

ชื่อโครงการ: การพัฒนากระบวนการตัดเรียบเพื่อเพิ่มคุณภาพความเที่ยงตรงผิวงานตัด

ชื่อนักวิจัย: **นาย สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ**
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail Address: sutasn.thi@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 15 มิถุนายน 2553 – 14 มิถุนายน 2555

บทคัดย่อ:

ในกระบวนการตัดโลหะแผ่นความเที่ยงตรงสูงมักมีปัญหาเกิดขึ้น คือ รอยแตกและครีบจึงต้องมีการขจัดรอยแตกและครีบซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนและเวลาการผลิต กระบวนการตัดโลหะแผ่นขอบเรียบดันกลับ ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานที่ไม่เกิดรอยแตกและครีบจึงถูกนำมาศึกษา กระบวนการตัดนี้มีขั้นตอนการตัดคือการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 โดยชิ้นงานยังไม่เกิดการแตกและตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 สวนทางจนกระทั้งชิ้นขาดออกจากกัน ดังนั้นในการศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการตัด ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการตัดขอบเรียบ ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ และการกินลึกในขั้นตอนการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ที่ส่งผลต่อลักษณะผิวรอยตัด นอกจากนี้ได้ตรวจสอบความหยาบผิวและความแข็งของผิวงานตัดของขั้นตอนการตัดเฉือน ขั้นตอนการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 และขั้นตอนการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 จากผลการศึกษาพบว่าผลการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง ดังนั้นอิทธิพลของทิศทางการตัดขอบเรียบสามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายความเค้นและความเครียดที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กระบวนการตัดโลหะแผ่นขอบเรียบดันกลับสามารถผลิตผิวงานตัดที่ปราศจากครีบได้โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสม

คำหลัก : ตัดเฉือน ตัดเรียบ รอยแตก ครีบ ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Project Code: MRG5380117

Project Title: Developing shaving process for increasing shaved surface precision

Investigator: Sutasn Thipprakmas

Tool and Materials Engineering Department

King's Mongkut University of Technology Thonburi

E-mail Address: sutasn.thi@kmutt.ac.th

Project Period: 15 June 2010 - 14 June 2012

Abstract:

In precision sheet metal cutting process, the major problems encountered are the crack and burr formations. Further operations are required to eliminate these formations, which increases the production cost and time. In the reciprocating shaving process, the work piece is half-shaved and then shaved again in the opposite direction. This process could be fabricated to produce a smooth-cut surface without any crack and burr formations. However, the shaving direction effects were not investigated. In the present study, the Finite Element Method (FEM) was used and laboratory experiments were performed to clarify the shaving direction effects. The shaving direction effects could be theoretically clarified on the basis of stress and strain distributions. The bending feature was a result of the half-shaving in the reverse shearing direction. Thus, tensile stress on the half-shaved work piece increased and crack formations occurred. In addition, the roughness and hardness of the surface half-shaved was higher in comparison to the sheared surface. However, the roughness and hardness of the half-shaved surface was rarely affected by the half-shaving direction. The bending feature was generated to some extent on the shaving operation. However, it was easily generated in the case of shaving in the parallel shearing direction. The FEM simulation results were validated by the laboratory experiments. It was found that the results corresponded suitably with the experimental results.

Keywords: Shearing, Shaving, Crack, Burr, Finite Element Method

1. Executive Summary

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

กระบวนการตัดโลหะแผ่น เป็นกระบวนการที่มีการใช้กันอย่างมากและมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะ กระบวนการตัดโลหะแผ่นนี้มีความสำคัญสำหรับการเตรียมแผ่นโลหะให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ สำหรับการนำไปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการดัด และกระบวนการลากขึ้นรูป เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการตัดโลหะแผ่นยังมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการตัดแผ่นโลหะ เพื่อให้ได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามที่ต้องการ ที่มีชื่อเรียกว่า “กระบวนการตัดแบลงค์ (Blanking process)” เนื่องจากคุณภาพของผิวรอยตัดที่ได้จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานนั้นๆ ในกระบวนการตัดแบลงค์ทั่วไป ผิวรอยตัดที่ได้จะเกิดรอยแตก (Crack) และครีบ (Burr) ซึ่งจะทำให้ความเที่ยงตรงของขนาดรูปร่างของชิ้นงานเสียไป ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขผิวรอยตัดนั้นด้วยกระบวนการปาดผิววัสดุต่างๆ เช่น กระบวนการกัด หรือกระบวนการเจีย เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มกระบวนการปาดผิววัสดุก็จะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของต้นทุนการผลิต ในปัจจุบันนอกจากการทำการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผิวรอยตัดเหล่านั้น ด้วยกระบวนการปาดผิววัสดุต่างๆ ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าว ด้วยกระบวนการตัดโลหะแผ่นความเที่ยงตรง เช่น กระบวนการตัดเรียบ (Shaving process) และกระบวนการตัดไฟน์แบลงค์ (Fine-blanking process) ซึ่งทำให้การแก้ข้อบกพร่องต่างๆ ทำได้รวดเร็วขึ้น เพราะเป็นการทำบนแม่พิมพ์ด้วยเครื่องเพรส ดังนั้นจึงทำให้อัตราการผลิตทำได้สูงกว่าการแก้ด้วยกระบวนการปาดผิววัสดุ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการตัดโลหะแผ่นความเที่ยงตรงก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ไม่สามารถทำการกำจัดครีบออกได้ แม้ว่าจะสามารถตัดได้ส่วนเรียบตรงของผิวรอยตัดโดยปราศจากรอยแตก สำหรับปัญหาครีบที่ยังคงค้างอยู่ก็จะส่งผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้นำไปใช้งาน เช่น อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องสุขภัณฑ์ เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนากระบวนการตัดเรียบ เพื่อให้สามารถทำการผลิตผิวรอยตัดให้ได้ส่วนเรียบตรงโดยไม่เกิดรอยแตก และที่สำคัญไม่เกิดครีบ จากผลของงานวิจัยนี้จะทำให้ได้รับองค์ความรู้ใหม่ของกระบวนการตัดโลหะแผ่น และจะทำให้เกิดการพัฒนาต่อยอดความก้าวหน้าในเชิงวิชาการ ของสาขาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ และจะเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นของประเทศไทย ไม่เพียงแต่ความก้าวหน้าในเชิงวิชาการ กระบวนการใหม่ที่ได้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรมเพราะกระบวนการใหม่นี้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้เป็นอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลทำให้ภาคอุตสาหกรรมในประเทศสามารถทำการแข่งขันกับต่างประเทศได้

เอกสารอ้างอิง

1. Lange K. Handbook of metal forming. New York: McGraw-Hill 308 Inc.; 1985.
2. Schuler. Metal forming handbook. Berlin, Heidelberg, New York: 306 Springer-Verlag; 1998.
3. Nobuhiro Koga and Aoki Tsumoto. Press working-blanking operation. Nikkan kougyou shibun sha; 2002 (In Japanese)
4. M. Samuel, FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process, Journal of Materials Processing Technology 84 (1998) 97–106.
5. S. Thipprakmas, S. Rojananan and P. Paramaputi: An investigation of step taper-shaped punch in piercing process using finite element method, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 197(2008), Pages 132-139.
6. Hoffmann, H. and Hormann, F. (2007), 'Improving the cut edge by counter-shaving', Key Engineering Materials, Vol. 344, pp. 217-224.
7. M. Murakawa, S. Thipprakmas and M, Jin: Investigation of The Relationship Between Shaved Surface and Shaving Allowance, Journal of JSTP., p.53-57, 44-513(2003) (In Japanese)
8. L.C. Chan, T.C. Lee, B.J. Wu, W.M. Cheung, Experimental study on the shearing behavior of fine-blanking versus bar cropping, Journal of Materials Processing Technology 80–81 (1998) 126–130.
9. F. Klocke, K. Sweeny, H.-W. Raedt, Improved tool design for fine blanking through the application of numerical modeling techniques, Journal of Materials Processing Technology. 115 (2001) 70-75.
10. R. Hambli, Finite element simulation of fine blanking processes using a pressure-dependent damage model, Journal of Materials Processing Technology. 116 (2001) 252-264.
11. T. S. Kwak, Y. J. Kim, W. B. Bae, Finite element analysis on the effect of die clearance on shear planes in fineblanking, Journal of Materials Processing Technology. 130-131 (2002) 462-468.

12. T. S. Kwak, Y. J. Kim, M. K. Seo, W. B. Bae, The effect of V-ring indenter on the sheared surface in the fineblanking process of pawl, Journal of Materials Processing Technology. 143-144 (2003) 656-661.
13. I. Aoki, T. Takahashi, Material flow analysis on shearing process by applying Fourier phase correlation method –Analysis of piercing and fineblanking–, Journal of Materials Processing Technology. 134 (2003) 45-52.
14. Z. H. Chen, L. C. Chan, T. C. Lee, C. Y. Tang, An investigation on the formation and propagation of shear band in fine-blanking process, Journal of Materials Processing Technology. 138 (2003) 610-614.
15. Z.H. Chen, C.Y. Tang, T.C. Lee, An investigation of tearing failure in fine-blanking process using coupled thermo-mechanical method, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 155–165.
16. L. C. Chan, Y.C. Leung, T.C. Lee, J.P. Fan, C.Y. Tang, Numerical simulation for fine-blanking—a new approach, Materials Science and Engineering A 364 (2004) 207–215.
17. S. Thipprakmas, M. Jin, M. Murakawa, Study on flanged shapes in fineblanked-hole flanging process (FB-hole flanging process) using finite element method (FEM), Journal of Materials Processing Technology. 192-193 (2007) 128-133.
18. S. Thipprakmas, M. Jin, M. Murakawa, An investigation of material flow analysis in fine-blanking process, Journal of Materials Processing Technology. 192-193 (2007) 237-242.
19. S. Thipprakmas, M. Jin, K. Tomokazu, Y. Katsuhiro, M. Murakawa, Prediction of Fineblanked Surface Characteristics using the Finite Element Method (FEM), Journal of Materials Processing Technology. 198 (2008) 391-398.
20. S. Thipprakmas and M. Jin: Investigation Mechanism of V-ring indenter Geometry in Fine-blanking Process, Key Engineering Materials, Volume 410-411(2009), Pages 305-312.
21. S. Thipprakmas: Finite-element analysis of V-ring indenter mechanism in fine-blanking process, Materials & Design,

2. วัตถุประสงค์

พัฒนากระบวนการตัดเรียบเพื่อเพิ่มคุณภาพความเที่ยงตรงผิวงานตัด

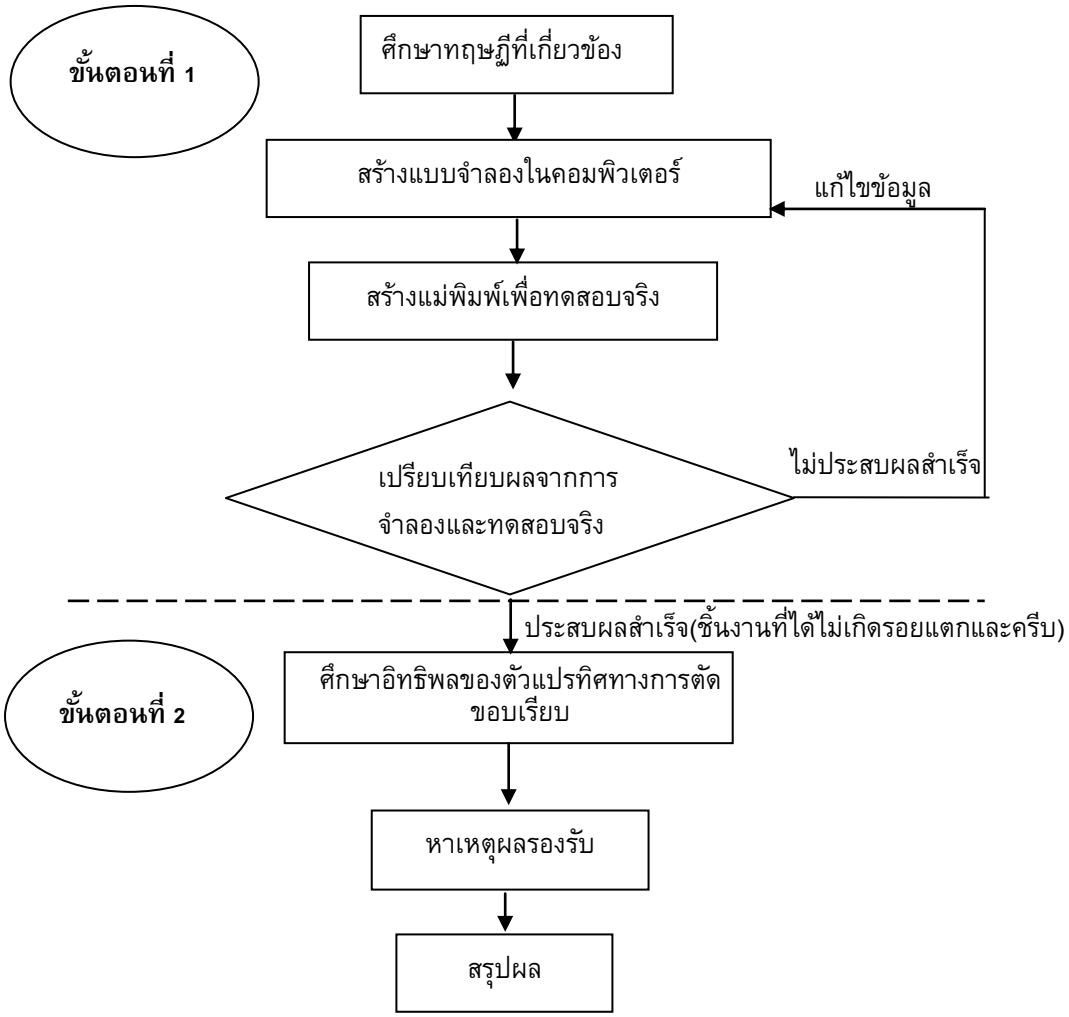
3. วิธีการทดลอง

3.1 แผนผังการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ คือ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการตัดขอบเรียบดันกลับ
2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดขอบเรียบดันกลับ

ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินงาน

3.2 การจำลองและการทดลองการตัดเฉือนและการตัดขอบเรียบ

ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการตัดและการตัดขอบเรียบ จากนั้นสร้างแบบจำลองและทำการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลไปทดสอบจริง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

1. คอมพิวเตอร์

Manufactured and supported by : Hewlett – Packard HP xw 6400 work station Intel(R) Xeon(R) CPU 5150 @ 2.66 GHz ,3.00 GB of RAM System : Microsoft Window XP Professional Version 2002 service Pack 2

รูปที่ 2 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

2. Software DEFORM-2D

Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC). : ออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์การไหลแบบสองมิติของโลหะในกระบวนกรขึ้นที่ซับซ้อน

3. เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Hardness Tester)

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความแข็งแม่พิมพ์ก่อนการทดลองและหลังการทดลอง ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MXT70 ซึ่งสามารถวัดความแข็งบริเวณผิวที่ต้องการได้ คุณสมบัติเครื่อง Vickers scales: HV1, HV5, HV10, HV20, HV30 และ HV50, Test force selection: dial, Test load: CV-450DAT: 1, 5, 10, 20, 30 และ 50, Load control: Automatic, Load duration: 5 to 60 sec

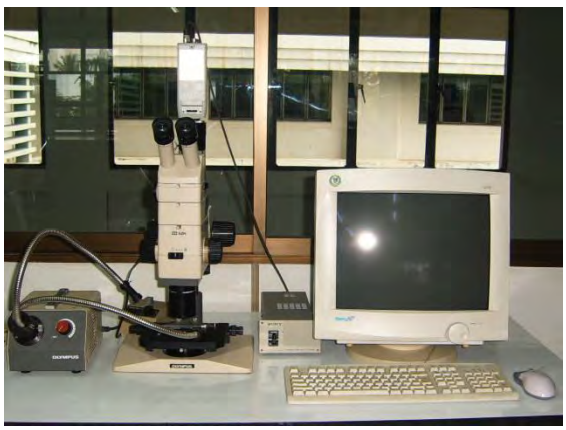
รูปที่ 3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

4. เครื่องวัดความเรียบผิวและวัดรูปร่างชิ้นงาน (Surface Roughness and Contour Measuring Device) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความหยาบผิวใบมีด ยี่ห้อ Taylor Hobson ใช้หัวเข็มวัดรูปร่างของชิ้นงานขนาดรัศมี 20 mm ลากบริเวณคมตัดของใบมีดจากนั้นวัดระยะการสึกหรอโดยใช้โปรแกรม TalyContour

รูปที่ 4 เครื่องวัดความหยาบผิวและวัดรูปร่างชิ้นงาน

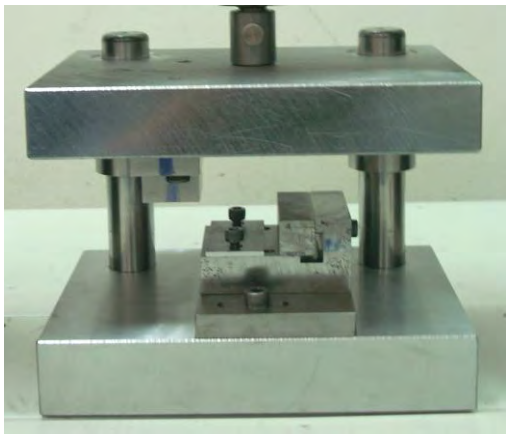
5. กล้องจุลทรรศน์

Stand 380 mm for Axiotech vario, Stand 640 mm for Axiotech vario, Floor space: 396x440 mm, Free distance optical axis-column, surface: 160 mm



รูปที่ 5 กล้องจุลทรรศ

6. แม่พิมพ์ที่ใช้ในการตัด



รูปที่ 6 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองตัดงาน

7. เครื่องทดสอบการดึง

เครื่องทดสอบการดึงขนาด 5 ตัน เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมระยะในการกดและเก็บค่าแรงที่ได้ในการทดลองนำไปเปรียบเทียบกับแรงที่ใช้ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 7 เครื่องทดสอบการดึง

3.3 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ ทฤษฎีเกี่ยวกับการตัดและการตัดขอบเรียบ โดยตัวแปรที่มีผลต่อรอยตัด มีดังนี้

- ระยะเคลียร์แรนซ์ในการตัดเฉือน ซึ่งในการจำลองจะเลือกใช้ระยะเคลียร์แรนซ์ที่ 1%, 3% และ 5% ความหนาวัสดุ ในที่นี้วัสดุคือ Al 1100 ความหนา 3 mm

- ระยะเผื่อในการตัดขอบเรียบ เลือกใช้ระยะเผื่อในการตัดขอบเรียบที่ระยะ 0.3 mm, 0.5 mm และ 0.7 mm วัดจากจุดสิ้นสุดของรอยแตกที่เกิดจากการตัดเฉือน

2. ศึกษาค่าสมบัติต่าง ๆของวัสดุ Al 1100 ที่จำเป็นต้องใส่ในโปรแกรม DEFORM - 2D ซึ่งใช้ในการทดสอบสมบัติวัสดุจะใช้เครื่อง Universal testing มาทำการดึงชิ้นงานทดสอบ แล้วนำค่าแรงที่ใช้ในการดึงมาทำการคำนวนหาค่าที่ต้องการ ค่าต่างที่คำนวนได้มีดังต่อไปนี้

- Flow stress ซึ่งบอกเป็นสมการ คือ $\bar{\sigma} = C\bar{\varepsilon}^{n}\,\dot{\bar{\varepsilon}}^{m} + y$

  โดยมีค่า C = 153.5 MPa และ n = 0.2

- Young's Modulus คือ 68,900 MPa

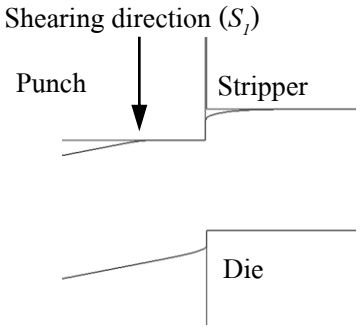
- Poisson's Ratio คือ 0.33

- Fracture บอกเป็นสมการ คือ Normalized C&L = $\int_{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^{*}}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}$

  และมีค่า Critical Value = 1.26

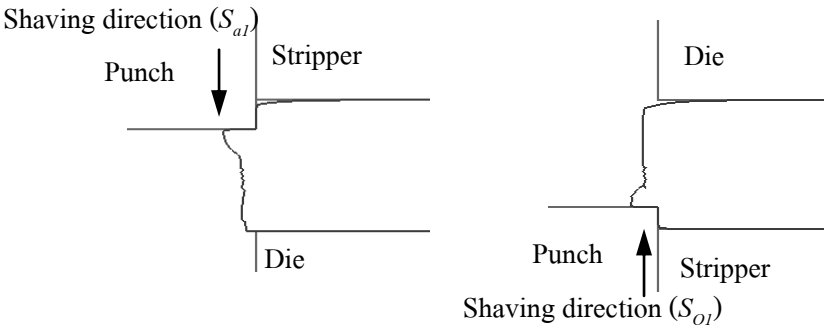
3. สร้างแบบจำลองการตัดทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม DEFORM-2D

- สร้างการจำลองการตัดเฉือนเป็นแบบความเครียดระนาบโดยสร้างชิ้นงานเริ่มต้นและทำการตัดให้ขาดออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 8



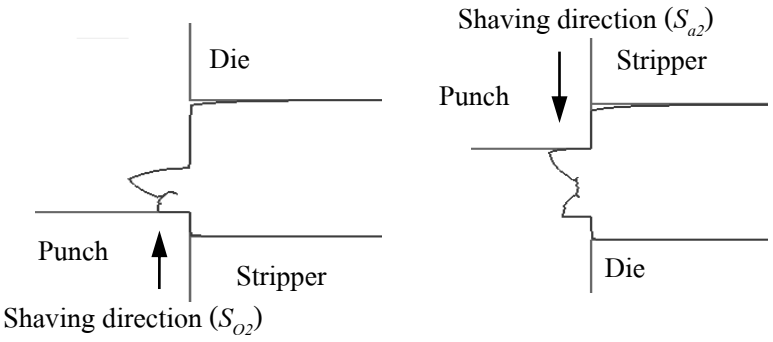
รูปที่ 8 แบบจำลองการตัดเฉือน

- สร้างแบบจำลองการตัดขอบเรียบแบบดันลงในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน และแบบดันขึ้นในทิศทางสวนทางกับการตัดเฉือน โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการตัดเฉือน มาทำการตัดขอบเรียบตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แบบจำลองการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1

- สร้างแบบจำลองการตัดขอบเรียบแบบดันขึ้น ในทิศทางสวนทางกันกับการตัดเฉือนและแบบดันขึ้นในทิศทางสวนทางกับการตัดเฉือนโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการตัดเฉือน มาทำการตัดขอบเรียบตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แบบจำลองการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

4. เงื่อนไขในการจำลองการตัด ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางบอกเงื่อนไขในการจำลองการตัดโดยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปแบบการจำลอง	แบบความเครียดระนาบ
การกำหนดประเภทวัสดุ	ชิ้นงาน : อิลาสโตพลาสติก พันช์/ดาย : วัสดุแข็งเกร็ง สทริปเปอร์ : วัสดุแข็งเกร็ง
วัสดุที่ใช้ในการจำลอง	A1100-O (ความหนา (*t*): 3 mm) (σ_B=102.5MPa, λ=43.5%)
ขนาดของวัสดุ	ความยาว: 60 mm, ความกว้าง: 35 mm
เคลียร์แรนซ์การตัดเฉือน (Cl_s)	1%*t* 3%*t* และ 5%*t*
เคลียร์แรนซ์การตัดขอบเรียบ (Cl_s	0%*t*
ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ (D_{sh})	0.3 mm 0.5 mm และ 0.7 mm
รัศมีคมตัด	0.01mm
สมการการไหลตัว	$\bar{\sigma} = 153.5\bar{\varepsilon}^{0.20} + 88$
สมการการแตกหัก	Normalized Cockroft&Latham
ค่าการแตกหัก (*C*)	1.26
ค่าความเสียดทาน (μ)	0.1

5. การทดลอง

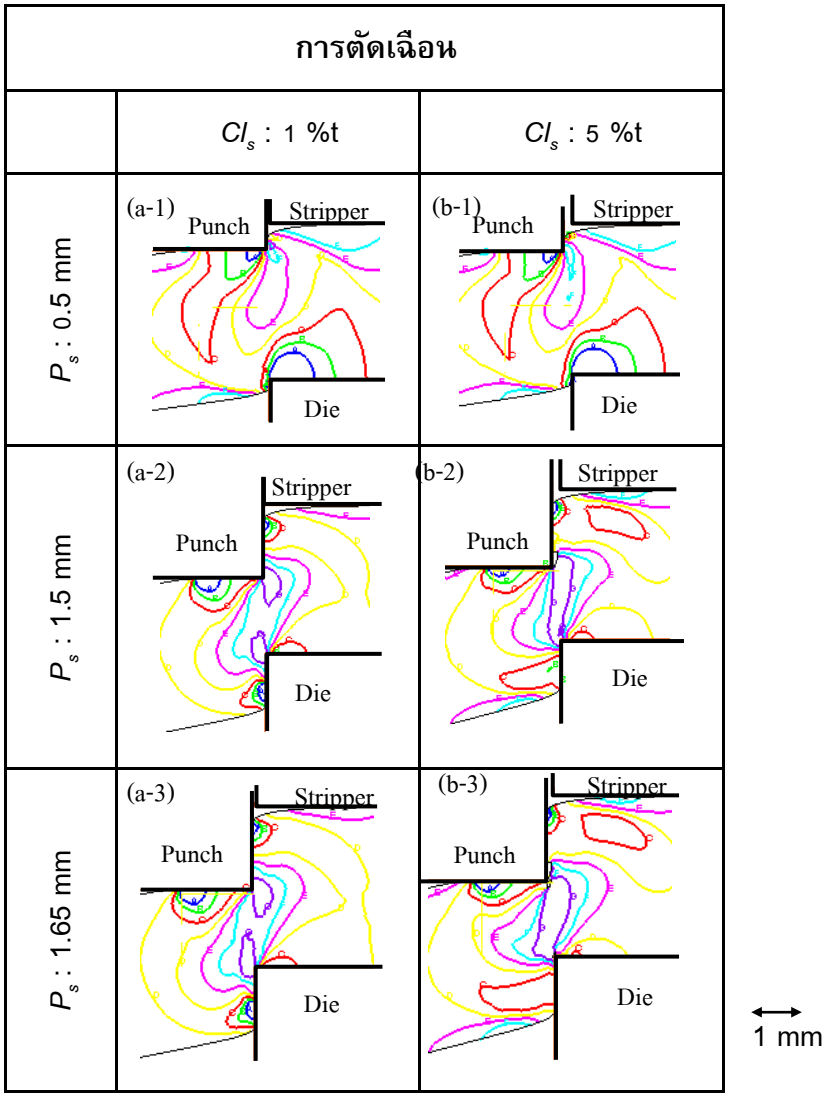
4. ผลการทดลอง

จากการทดลองและการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง คือการทดลองการตัดเฉือน และการตัดขอบเรียบ ส่วนผลของการตัดขอบเรียบนั้นจะได้รับอิทธิพลจากทิศทางการตัดขอบเรียบ ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ และระยะความลึกของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1

4.1 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

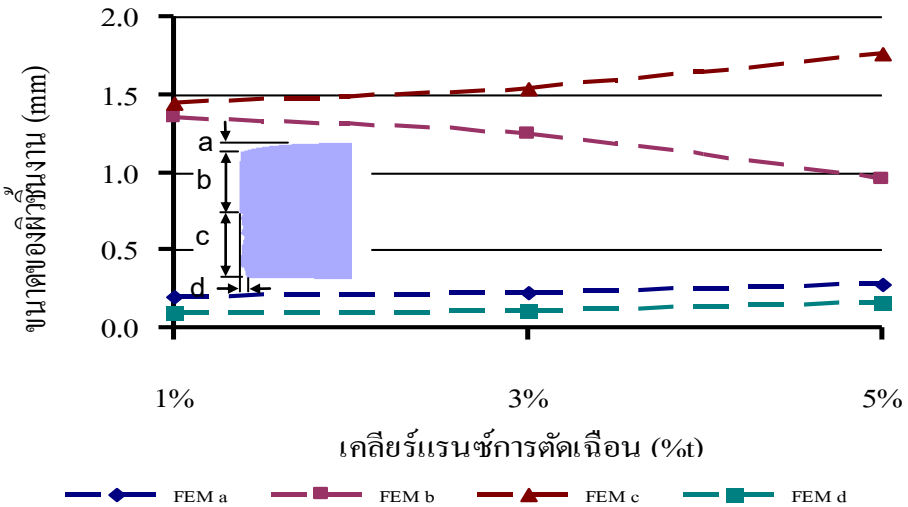
4.1.1 ผลการตัดเฉือน

การจำลองการตัดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FEM) สามารถดูได้จากรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบค่าความเค้นการตัดเฉือนระหว่างเคลียร์แรนซ์(Cl_s) ที่ 1%t กับ 5%t ในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ในการตัดเฉือน(P_s) ต่าง ๆ กัน รูปที่ 11(a-1) และรูปที่ 11(b-1) แสดงให้เห็นว่าเกิดค่าความเค้นบริเวณคมตัดของพันช์ที่เคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนที่ 5%t มีมากกว่าเคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนที่ 1%t และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระยะการเคลื่อนที่ของพันช์เพิ่มขึ้น เมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปถึงระยะ 1.5 mm จะเริ่มมีค่าความเค้นมากขึ้นบริเวณคมตัดของดายดังแสดงในรูปที่ 11(a-2) และค่าความเค้นนี้จะมากขึ้นและวิ่งเข้าหากันเมื่อระยะการเคลื่อนที่ของพันช์เพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 11(a-3) ส่วนรูปที่ 11(b-2) และรูปที่11(b-3) เนื่องจาก ค่าความเค้นของการตัดเฉือนที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 5%t ที่เกิดขึ้นมากกว่าเคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนที่ 1%t จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่เกิดการแตกเร็วกว่า จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลต่อการเกิดรอยบริเวณผิวชิ้นงานที่ต่างกันด้วย จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเคลียร์แรนซ์น้อยจะทำให้เกิดส่วนเรียบตรงมาก แต่ส่วนโค้งมนรอยแตกและความลึกรอยแตกจะน้อย ในทางกลับกันเมื่อระยะเคลียร์แรนซ์มากขึ้นส่วนเรียบตรงที่ได้ก็จะน้อยลง แต่ส่วนโค้งมน รอยแตกและความลึกรอยแตกจะมากขึ้น นอกจากนี้แรงที่ใช้ในการตัดเฉือนที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 1%t มากกว่า ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 5%t แสดงในรูปที่ 13 เมื่อทำการตัดเฉือนแล้วชิ้นงานที่ได้จะมีค่าความเครียดตกค้างอยู่เนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนรูปในช่วงของพลาสติก และค่าความเครียดนี้จะมีค่าต่างกันตามระยะเคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนที่ต่างกัน จะเห็นว่าเคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนที่น้อยจะส่งผลต่อบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปมีบริเวณกว้างผลให้ส่วนเรียบตรงที่ได้มีค่ามากดังแสดงในรูปที่ 14(a-1) และจะมีค่าลดลงเมื่อเคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนมากขึ้นแสดงในรูปที่ 14(a-2) และรูปที่ 14(a-3) ค่าความเครียดจะเกิดขึ้นมากรอบ ๆ บริเวณรอยแตก และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลต่อการตัดขอบเรียบครั้งต่อไป



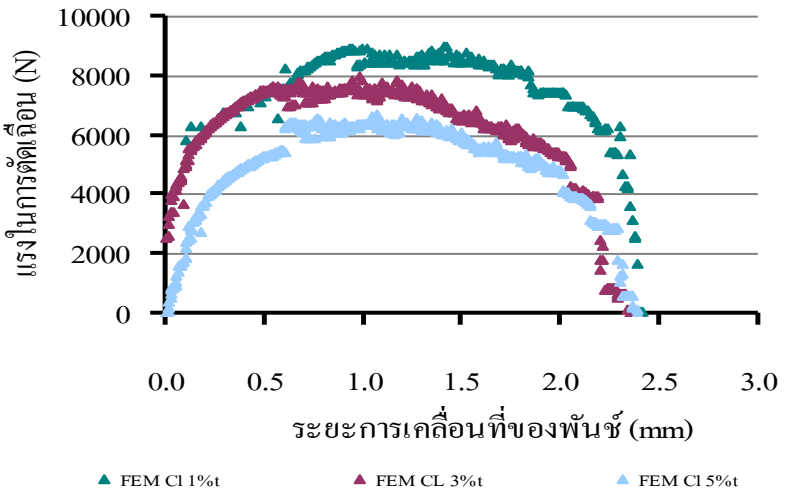
A = -150, B = -107, C = -64.3, D =-21.4, E = 21.4, F = 64.3, G = 107

รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดเฉือน (Cl_s:1%t และ 5%t)

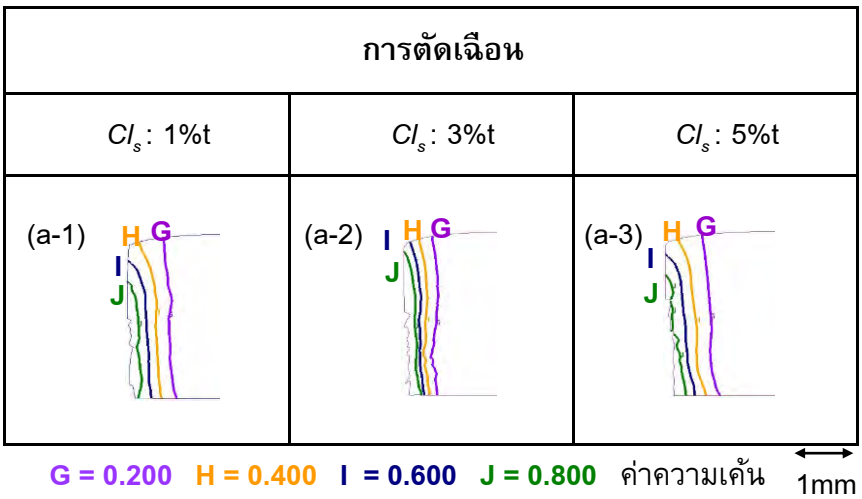


a: ส่วนโค้งมน, b: ส่วนเรียบตรง, c: รอยแตก, d: ความลึกรอยแตก

รูปที่ 12 เปรียบเทียบขนาดผิวชิ้นงานจากการเฉือน (Cl_s: 1%t 3%t และ 5%t)



รูปที่ 13 เปรียบเทียบแรงจากการเฉือน (Cl_s: 1%t 3%t และ 5%t)



รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความเครียดของการตัดเฉือน(Cl_s: 1%t 3%t และ 5%t)

4.1.2 ผลการตัดขอบเรียบ

นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดเฉือนที่ระยะเคลียร์แรนซ์ต่างๆ มาทำการตัดขอบเรียบ ในส่วนนี้จะศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องในขบวนการตัดขอบเรียบนี้

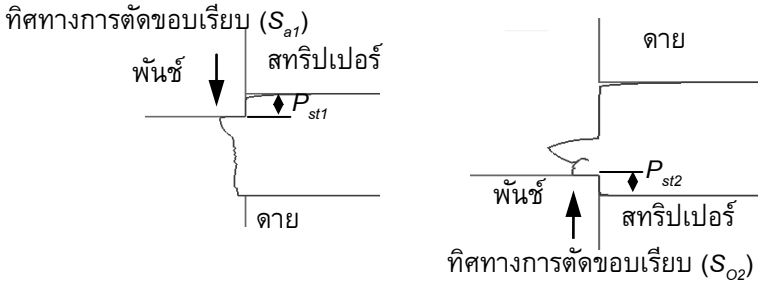
ตัวแปรแรกคือ อิทธิพลจากทิศทางการตัดขอบเรียบ โดยจะทำการตัดขอบเรียบ 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 ทำการตัดขอบเรียบครั้งแรกทิศเดียวกับการตัดเฉือน (S_{a1}) แล้วจึงตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 ในทิศสวนทางกับการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (S_{O2}) และจะทำการตัดชิ้นงานในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ (P_{st1}) ต่างๆ แล้วจึงนำไปทำการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 ด้วยระยะการเคลื่อนที่พันช์(P_{st2}) ต่างๆ แสดงในรูปที่ 15

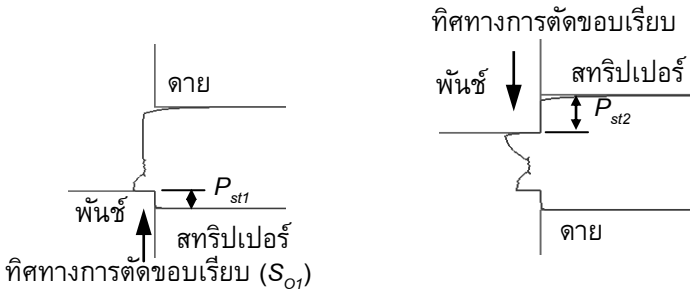
แบบที่ 2 ทำการตัดขอบเรียบครั้งแรกในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน (S_{O1}) แล้วจึงตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 ในทิศสวนทางกับการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (S_{a2}) แล้วจึงตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 ในทิศสวนทางกับการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (S_{O2}) และจะทำการตัดชิ้นงานในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ (P_{st1}) ต่างๆ แล้วจึงนำไปทำการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 ด้วยระยะการเคลื่อนที่พันช์(P_{st2}) ต่างๆ แสดงในรูปที่ 16

ตัวแปรที่สองคือ ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ (D_{sh}) ในที่นี้จะใช้ระยะเผื่อ 0.3 mm 0.5 mm และ 0.7 mm แสดงในรูปที่ 17

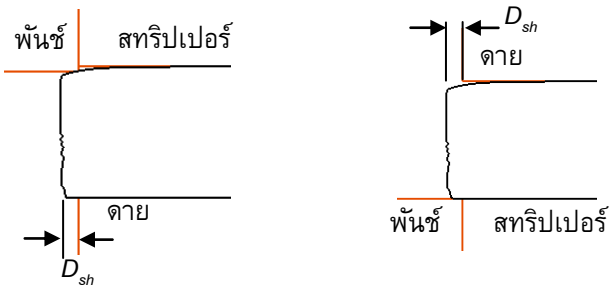
ตัวแปรสุดท้ายคือระยะเคลื่อนที่ของพันช์ในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (P_{st1}) ที่ระยะ 1.0 mm 1.5 mm และ 2.0 mm แสดงในรูปที่ 18



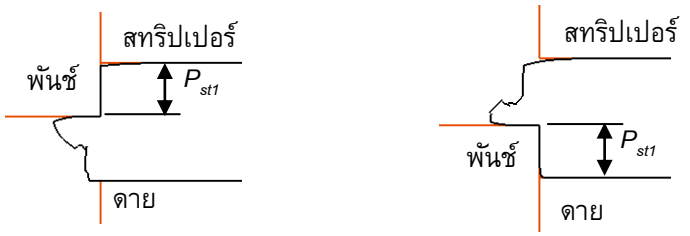
รูปที่ 15 การตัดขอบเรียบแบบที่ 1



รูปที่ 16 การตัดขอบเรียบแบบที่ 2



รูปที่ 17 ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ (D_{sh})



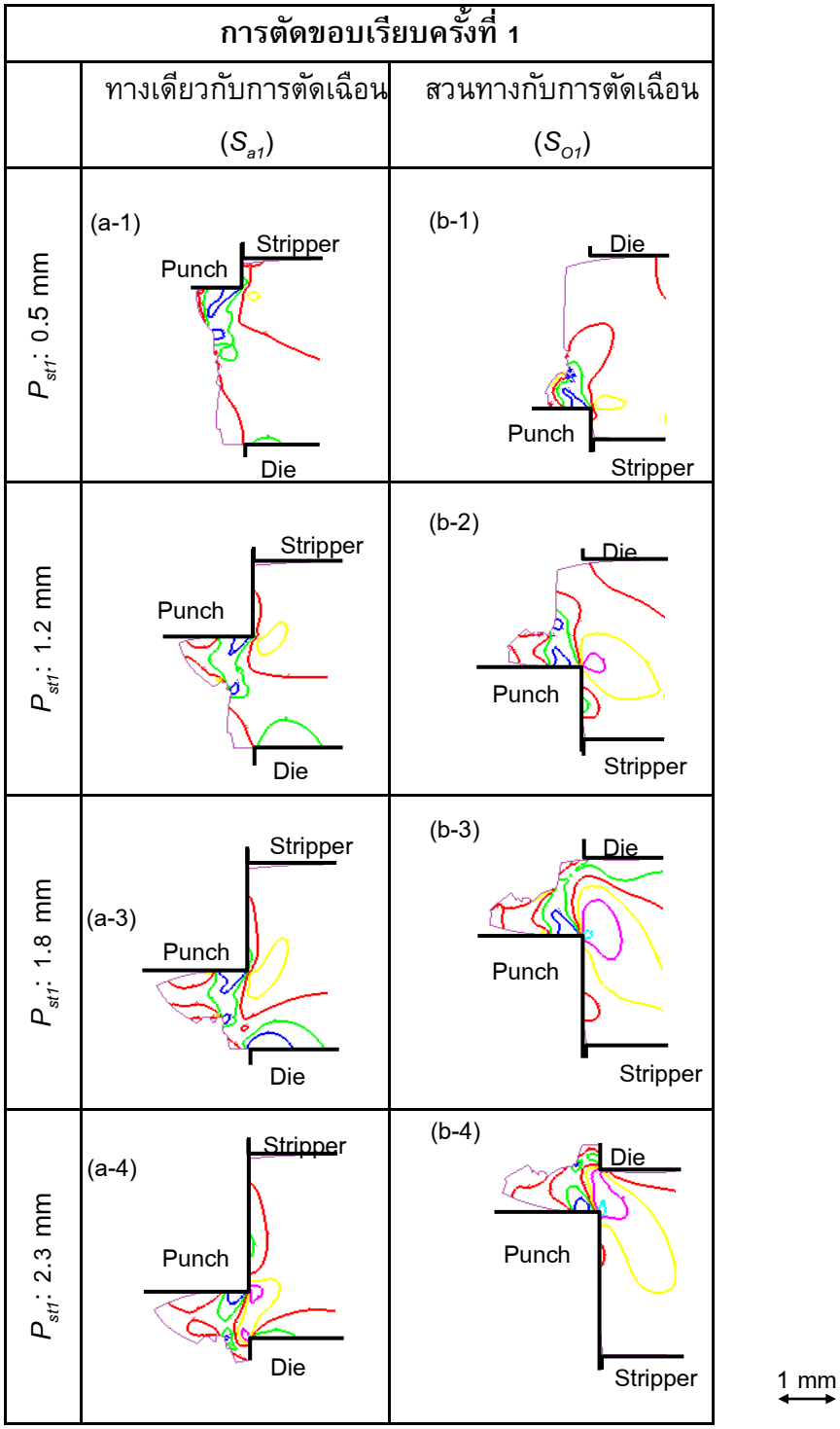
รูปที่ 18 ระยะการเคลื่อนที่ของการตัดเรียบครั้งที่ 1 (P_{st1})

4.2 อิทธิพลของทิศทางการตัดขอบเรียบ

4.2.1 การตัดขอบเรียบครั้งแรก

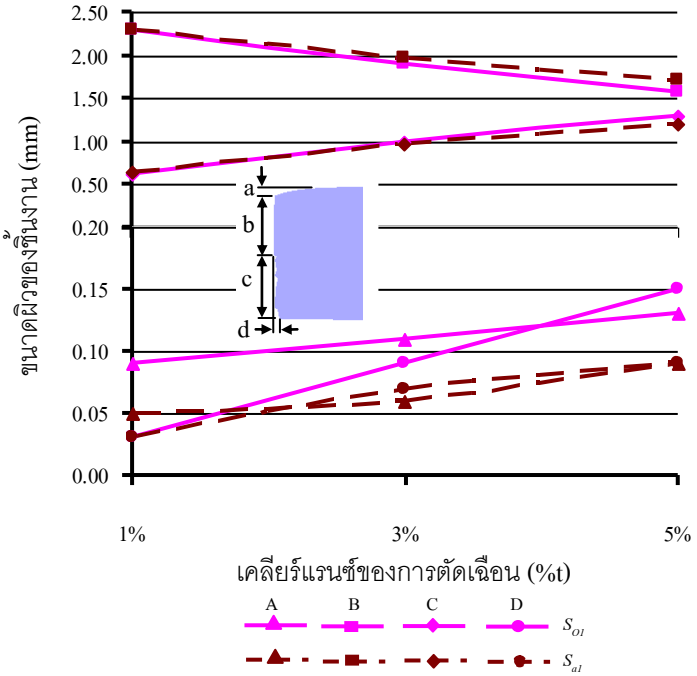
การเปรียบเทียบค่าความเค้นขณะทำการตัดขอบเรียบครั้งแรกเปรียบเทียบกันระหว่างการตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดเฉือนกับการตัดขอบเรียบในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน ผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ที่ 0.5 mm ลักษณะการเกิดค่าความเค้นมีลักษณะที่คล้ายกันคือมีลักษณะเป็นค่าความเค้นอัดและเกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่เป็นเป็นเศษ แสดงในรูปที่ 19(a-1) และรูปที่ 19(b-1) เมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปได้ระยะ 1.2 mm จะเห็นว่าลักษณะของเศษที่เกิดขึ้นเริ่มต่างกัน เศษที่พันช์เคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกับการตัดเฉือนจะมีขนาดใหญ่กว่าเศษที่พันช์เคลื่อนที่ไปในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน จึงส่งผลให้เกิดส่วนโค้งมนที่มากกว่าตามไปด้วย แสดงในรูปที่19(a-2) และรูปที่ 19(b-2) เมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปได้ระยะ 1.8 mm จะเห็นว่าการตัดขอบเรียบในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือนจะเกิดความเค้นอัดบริเวณผิวคมตัดดาย แสดงในรูปที่19(a-3) ส่วนการตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดเฉือนจะเกิดค่าความเค้นดึงขึ้นจนทำให้เกิดลักษณะคล้ายกับการดัดขึ้นจนทำให้ชิ้นงานถูกดันกลับไปสัมผัสกับผิวของดาย แสดงในรูปที่19(b-3) เมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปได้ระยะ 2.3 mm การตัดขอบเรียบในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน จะทำให้ชิ้นงานเกิดค่าความเค้นอัดที่เพิ่มมากขึ้นจนชิ้นงานเริ่มเกิดการแตกแสดงในรูปที่ 19(a-4) ส่วนการตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดเฉือนจะเกิดค่าความเค้นดึงมากขึ้นจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกเช่นกันแสดงในรูปที่ 19(b-4) จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลต่อการเกิดรอยบริเวณผิวชิ้นงานที่ต่างกันด้วย จากรูปที่ 20 แสดงให้เห็นว่าการตัดขอบเรียบที่ระยะเคลียร์แรนซ์น้อยจะทำให้เกิดส่วนเรียบตรงมาก แต่ส่วนโค้งมน รอยแตกและความลึกรอยแตกจะน้อย ในทางกลับกันเมื่อระยะเคลียร์แรนซ์มากขึ้นส่วนเรียบตรงที่ได้ก็จะน้อยลง แต่ส่วนโค้งมน รอยแตกและความลึกรอยแตกจะมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทิศทางในการเคลื่อนที่ต่างกัน การเคลื่อนที่สวนทางกับการตัดเฉือนจะให้ส่วนเรียบตรงที่มากกว่าการเคลื่อนที่ทางเดียวกับการตัดเฉือน นอกจากนี้แรงที่ใช้ในการตัดเฉือนที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 1%t มีค่ามากกว่า ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 3% และ 5%t แสดงในรูปที่ 21 เมื่อทำการตัดขอบเรียบแล้วชิ้นงานที่ได้จะมีค่าความเครียดตกค้างอยู่เนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนรูปในช่วงของพลาสติก และค่าความเครียดนี้จะมีค่าต่างกันตามทิศทางการตัดขอบเรียบและระยะเคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนที่ต่างกัน จะเห็นว่าทิศทางการตัดขอบเรียบที่เคลื่อนที่สวนทางกับการตัดเฉือน รูปที่ 22(a-2) จะมีบริเวณที่กว้างกว่าการเคลื่อนที่ทางเดียวกับการตัดเฉือนรูปที่ 22(a-1) เพราะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบการดัดเกิดขึ้นด้วย

เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเคลียร์แรนซ์การตัดเฉือนที่มากกว่าจะส่งผลต่อบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูป มีบริเวณแคบผลให้ส่วนเรียบตรงที่ได้มีค่าน้อยดังแสดงในรูปที่ 22(b-1) และ รูปที่ 22(b-2) และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลต่อการตัดขอบเรียบครั้งต่อไป



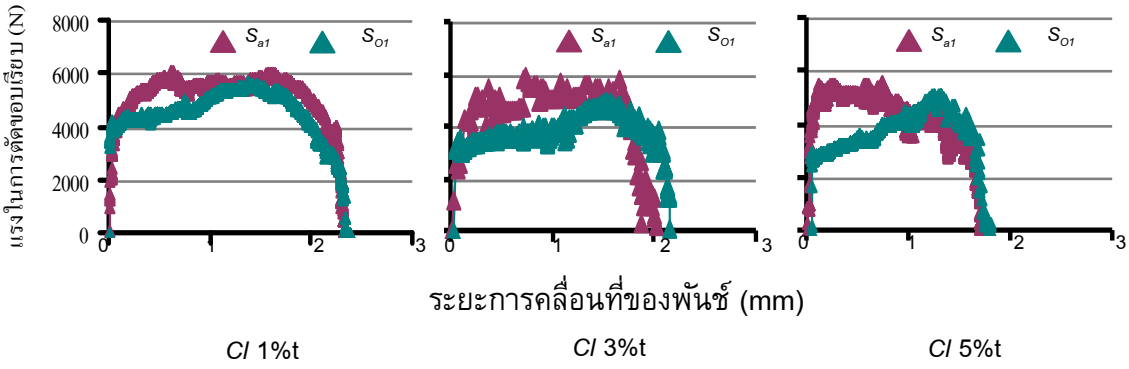
A = -140, B = -84, C = -28, D = -28, E = 84, F = 140 ค่าความเค้น

รูปที่ 19 เปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดเรียบครั้งที่ 1 (Cl_s: 1%t, Cl_{sh}: 0%t, D_{sh}: 0.3 mm)

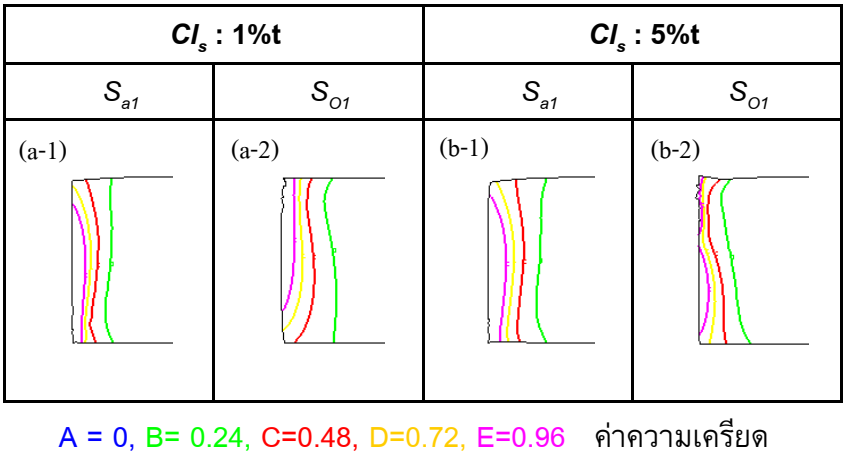


a: ส่วนโค้งมน, b: ส่วนเรียบตรง, c: รอยแตก, d: ความลึกรอยแตก

รูปที่ 20 เปรียบเทียบขนาดผิวชิ้นงานการตัดเรียบครั้งที่ 1 (Cl_{sh}: 0%t, D_{sh} : 0.3 mm)



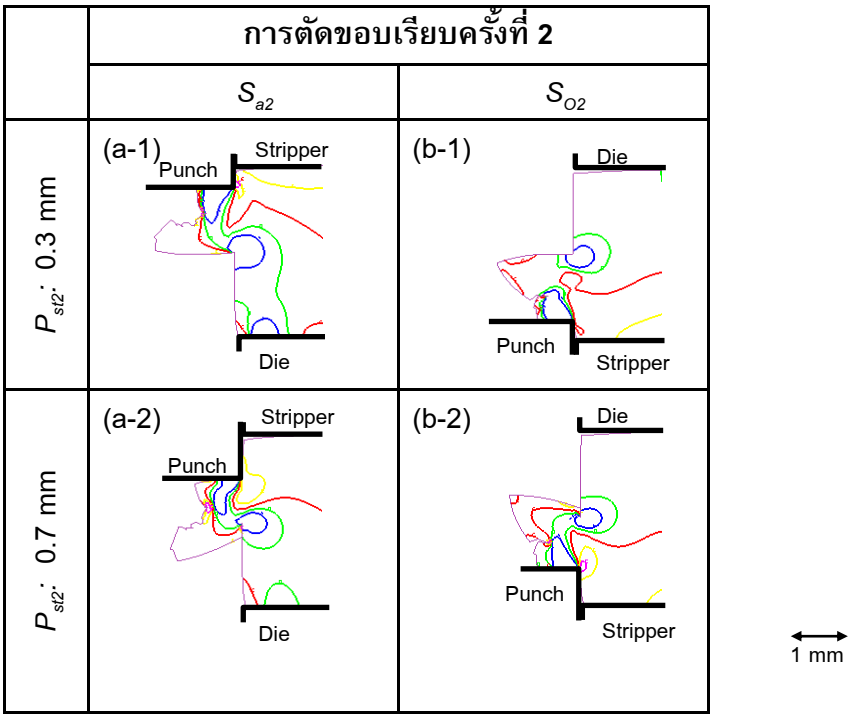
รูปที่ 21 เปรียบเทียบแรงจากการตัดเรียบครังที่ 1 (Cl_{sh}: 0%t, D_{sh}: 0.3 mm)



รูปที่ 22 เปรียบเทียบค่าความเครียดของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (Cl_{sh}: 0%t, D_{sh}: 0.3 mm)

4.2.2 การตัดขอบเรียบครั้งที่สอง

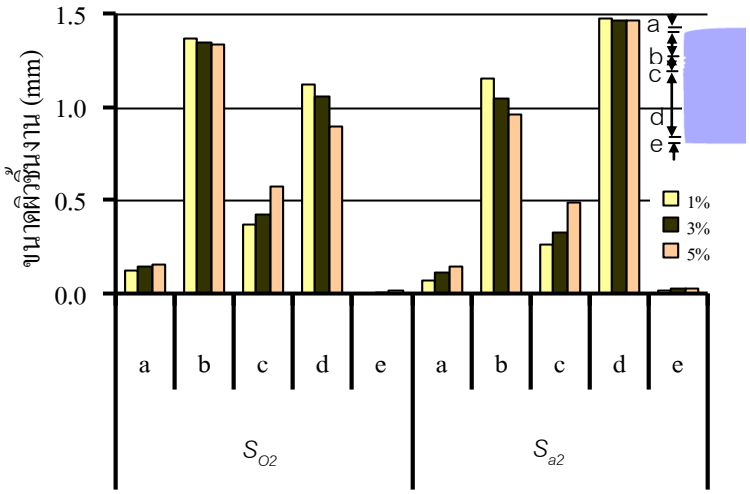
ในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 ในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ที่ 0.3 mm ทิศทางการเคลื่อนที่ของพันช์ในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือนจะเห็นว่าพันช์เคลื่อนที่ตัดชิ้นงานจากบริเวณที่มีเศษใหญ่ไปหาบริเวณที่มีเศษเล็ก จึงทำให้เกิดการดัดงอของเศษขึ้นส่งผลให้เกิดค่าความเค้นดึงขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 23(a-1) ในทางตรงกันข้าม ในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพันช์ในทิศสวนทางกับการตัดเฉือนจะเห็นว่าพันช์เคลื่อนที่ตัดชิ้นงานจากบริเวณที่มีเศษเล็กไปหาบริเวณที่มีเศษใหญ่ ลักษณะการไหลของเศษจึงง่ายขึ้น ทำให้ไม่เกิดการดัดงอและเกิดค่าความเค้นดึงที่น้อยกว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของพันช์ในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน แสดงในรูปที่ 23(b-1) เมื่อระยะการเคลื่อนที่ของพันช์มีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะการเกิดการดัดงอของเศษก็มีค่ามากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากเศษมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นตามระยะพันช์สโตรกที่มากขึ้นจึงส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ของพันช์ยากมากขึ้นด้วย แสดงในรูปที่ 23(a-2) และ 23(b-2) จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้ทราบว่าการตัดแบบที่ 2 ทำการตัดขอบเรียบครั้งแรกในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน แล้วจึงตัดขอบเรียบครั้งที่สอง ในทิศสวนทางกับการตัดขอบเรียบครั้งแรกง่ายกว่า แบบที่ 1 ทำการตัดขอบเรียบครั้งแรกทิศเดียวกับการตัดเฉือน แล้วจึงตัดขอบเรียบครั้งที่สอง ในทิศสวนทางกับการตัดขอบเรียบครั้งแรก จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ส่วนเรียบตรงที่ได้ในทิศทางตรงข้ามกับการตัดเฉือนมีค่ามากกว่าทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน เมื่อเทียบเปอร์เซนต์เคลียร์แรนซ์ที่ต่างกันจะเห็นว่าเปอร์เซนต์เคลียร์แรนซ์ที่ 1%t ได้ส่วนเรียบตรงที่มากกว่า 3%t และ 3%tแสดงในรูปที่ 24 และยังทำให้แรงที่ใช้ในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 มีลักษณะดังรูปที่ 25 เป็นการเปรียบเทียบแรงการตัดขอบเรียบในทิศเดียวกับการตัดขอบเรียบและสวนทางกับการตัดขอบเรียบ



A = -140, B = -84, C = -28, D = -28, E = 84, F = 140 ค่าความเค้น

รูปที่ 23 การเปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

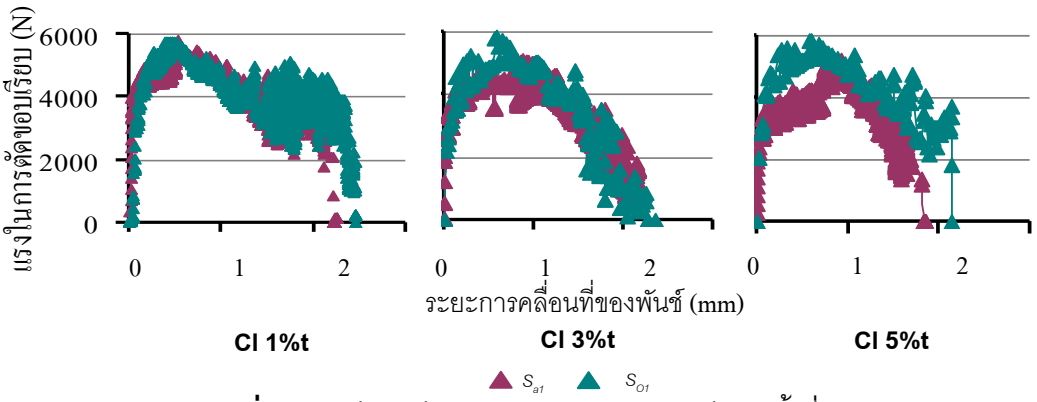
(CI_s: 1%t, CI_{sh}: 0%t, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 1.5 mm)



a: ส่วนโค้งมนบน, b: ส่วนเรียบตรงบน, c: รอยแตก, d: ส่วนเรียบตรงล่าง, e: ส่วนโค้งมนล่าง

รูปที่ 1.24 เปรียบเทียบขนาดผิวชิ้นงานจากการตัดขอบเรียบ

(CI_s : 1%t และ 3%t, D_{sh} : 0.3 mm, P_{st1} : 1.5 mm)



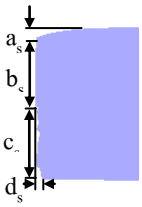
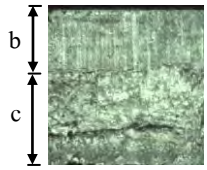
รูปที่ 25 เปรียบเทียบแรงจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

(Cl_{sh}: 0%t, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 1.0 mm)

4.3 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองการตัดชิ้นงานจริง

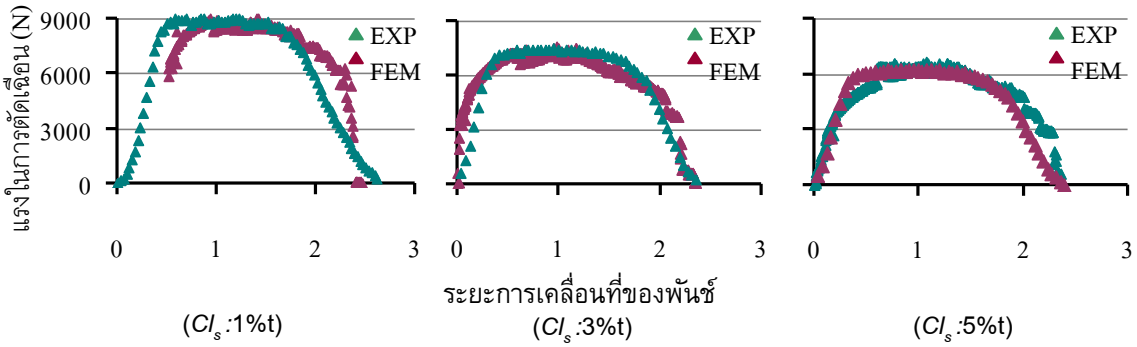
4.3.1 การตัดเฉือน

ตัวอย่างการตัดเฉือนที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับการทดลอง ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 1%t, 3%t และ 5%t จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง จะได้ว่าที่บริเวณผิวงานตัดจะเกิดส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรง และรอยแตกขึ้น โดยจะเกิดส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรง รอยแตกและความลึกรอยแตกแสดงในรูปที่ 26 จะเห็นว่าเมื่อระยะเคลียร์แรนซ์เพิ่มขึ้นส่วนเรียบตรงที่ได้จะลดลง จึงส่งผลต่อขนาดผิวชิ้นงานที่ได้ โดยส่วนเรียบตรงจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะเคลียร์แรนซ์การตัดชิ้นงานลดลง มีค่าความแตกต่างผิดพลาดของส่วนเรียบตรงจากการจำลองและการทดลองประมาณ 1.2%, 1.1% และ 1.5% รูปที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตัดเฉือน ของการจำลองและการทดลองที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 1%t, 3%t และ 5%t จะได้ว่าแรงจากการทดลองและแรงจากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าความแตกต่างผิดพลาดของแรงจากการจำลองและการทดลองประมาณ 4.5%, 2.1% และ 1.8% จากผลการจำลองและผลการทดลองจะพบว่าผลของลักษณะผิวงานตัดที่ได้ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ผลของแรงที่ได้จากการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งผลทั้งหมดนี้สอดคล้องอย่างดีกับทฤษฎีการตัดเฉือนจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งและความเรียบผิวเพิ่มขึ้นได้ทำการวัดบริเวณผิวชิ้นงานบริเวณส่วนเรียบตรง ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้คือ 60.02 HV และความเรียบผิวเฉลี่ย 0.495 μm

	ระยะเคลียร์แรนซ์		
	Cl_s: 1%t	Cl_s: 3%t	Cl_s: 5%t
ผลการจำลอง			
	a_s = 0.21, b_s = 1.34, c_s = 1.45, d_s = 0.03	a_s = 0.23, b_s = 1.24, c_s = 1.53, d_s = 0.09	a_s = 0.27, b_s = 0.97, c_s = 1.76, d_s = 0.15
ผลการทดลอง			
	a_e = 0.24, b_e = 1.33, c_e = 1.46,	a_e = 0.26, b_e = 1.25, c_e = 1.55	a_e = 0.28, b_e = 0.95, c_e = 1.79

a_s, a_e = ส่วนเรียบตรง, b_s, b_e = ส่วนโค้งมน, c_s, c_e = รอยแตก

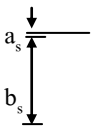
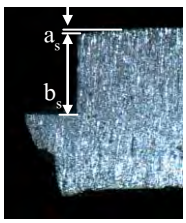
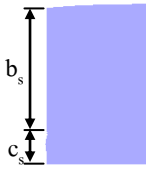
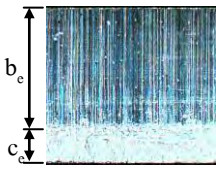
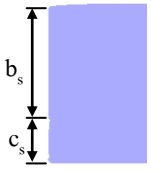
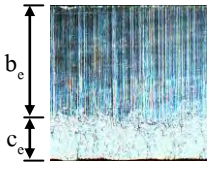
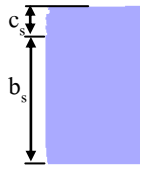
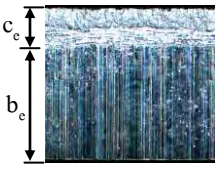
รูปที่ 26 เปรียบเทียบผิวชิ้นงานในการตัดเฉือน



รูปที่ 27 เปรียบเทียบแรงในการตัดเฉือน

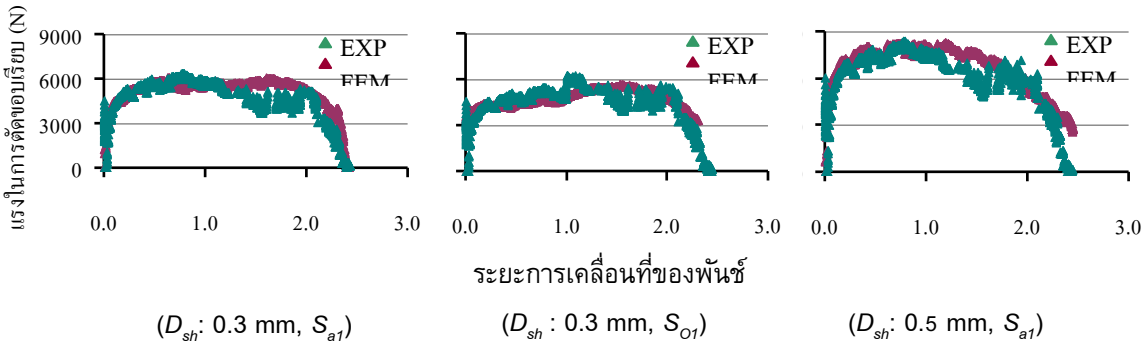
4.3.2 การตัดขอบเรียบครั้งที่ 1

รูปที่ 28 แสดงตัวอย่างการตัดขอบเรียบที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับการทดลอง ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 1%t จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง จะได้ว่าที่บริเวณผิวงานตัดจะเกิดส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรงที่มากขึ้น รอยแตกขึ้น และความลึกรอยแตกที่น้อยลงการตัดขอบเรียบทางเดียวกับการตัดเฉือน ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm และ การตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ตัดขาด มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 3.2% แสดงในรูปที่ 28 (a-1) และ รูปที่ 28(a-2) ที่ตัวแปรต่างๆเท่าเดิมเปลี่ยนทิศทางการตัดขอบเรียบ มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 2.9% แสดงในรูปที่ 28 (b-1) และ รูปที่ 28(b-2) ที่ตัวแปรเท่าเดิมเปลี่ยนระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 2.7% แสดงในรูปที่ 28 (c-1) และ รูปที่ 28(c-2) และสุดท้ายตัวแปรเดิมเปลี่ยนระยะความลึกการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 3.1% แสดงในรูปที่ 28(d-1) และ รูปที่ 28(d-2) การเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตัดขอบเรียบจะได้ว่าแรงจากการทดลองและแรงจากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าความแตกต่างผิดพลาดของแรงจากการจำลองและการทดลองประมาณ 2.1%, 2.5% 2.9% และ 2.6% ตามลำดับแสดงรูปที่ 29(a) รูปที่ 29(b) รูปที่ 29(c) และ รูปที่ 29(d) เมื่อวัดความแข็งแรงและความเรียบผิวบริเวณส่วนเรียบตรงได้ค่าความแข็งเฉลี่ย 62 HV และความเรียบผิวเฉลี่ย 0.210 μm

S_{a1}, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 1.5 mm		**S_{a1}, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 3 mm**	
FEM	EXP	FEM	EXP
(a-1) 	(a-2) 	(b-1) 	(b-2) 
a_s = 0.27, b_s = 1.05,	a_e = 0.29, b_e = 1.00	a_s = 0.27, b_s = 1.96, c_s = 0.98	a_e = 0.29, b_e = 1.89, c_e = 0.96
S_{a1}, D_{sh}: 0.5 mm, P_{st1}: 3 mm		**S_{O1}, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 3.0 mm**	
FEM	EXP	FEM	EXP
(c-1) 	(c-2) 	(d-1) 	(d-2) 
a_s = 0.20, b_s = 1.68, c_s = 1.27	a_e = 0.22, b_e = 1.64, c_e = 1.30	a_s = 0.02, b_s = 1.98, c_s = 1.00	a_e = 0.03, b_e = 1.95, c_e = 1.03

a_s, a_e = ส่วนโค้งมนส่วน, b_s, b_e = เรียบตรง, c_s, c_e = รอยแตก

รูปที่ 28 เปรียบเทียบผิวชิ้นงานในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (CI_s: 1%t, CI_{sh} : 0%t)

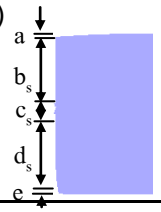
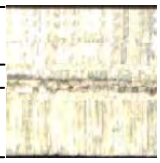
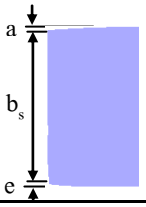
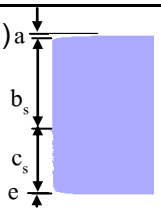
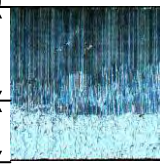
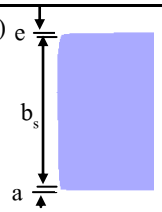
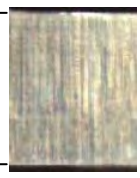


(D_{sh}: 0.3 mm, S_{a1}) (D_{sh} : 0.3 mm, S_{O1}) (D_{sh}: 0.5 mm, S_{a1})

รูปที่ 29 เปรียบเทียบแรงในการตัดเรียบครั้งที่ 1 (CI_s: 1%t , CI_{sh}: 0%t)

4.3.3 การตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

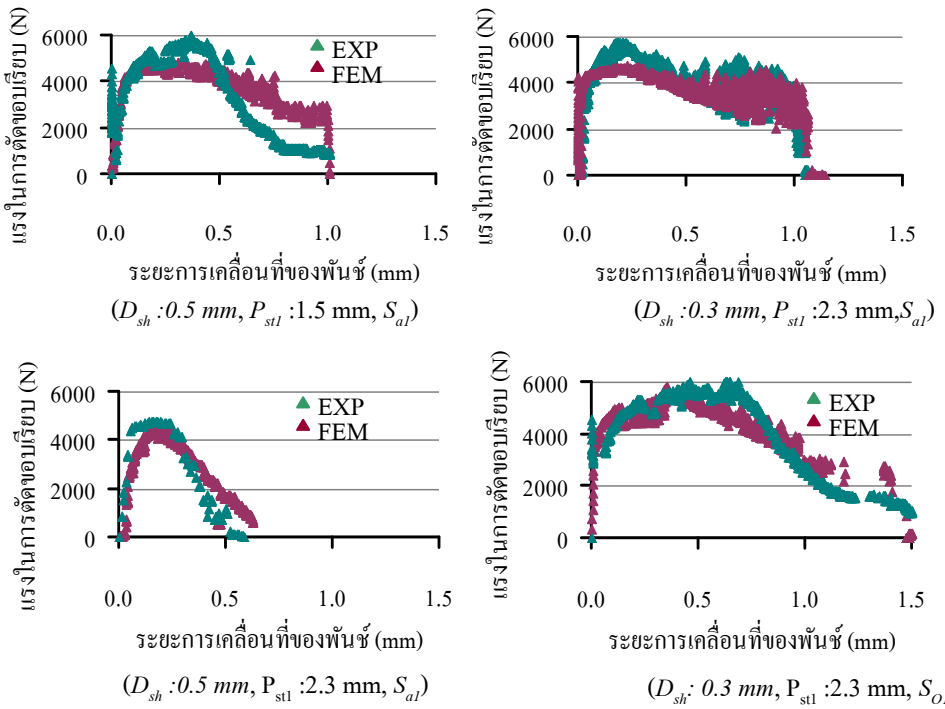
รูปที่ 30 แสดงตัวอย่างการตัดขอบเรียบที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับการทดลอง ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 1%t จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง จะได้ว่าที่บริเวณผิวงานตัดจะเกิดส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรงที่มากขึ้น รอยแตกขึ้น และความลึกรอยแตกที่น้อยลงการตัดขอบเรียบทางเดียวกับการตัดเฉือน ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm และการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ตัดขาด มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 3.9% แสดงในรูปที่ 30(a-1) และ รูปที่ 30(a-2) ที่ตัวแปรต่างๆเท่าเดิมเปลี่ยนทิศทางการตัดขอบเรียบ มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 3.4% แสดงในรูปที่ 30 (b-1) และ รูปที่ 30(b-2) ที่ตัวแปรเท่าเดิมเปลี่ยนระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 3.6% แสดงในรูปที่ 30(c-1) และ รูปที่ 30(c-2) และสุดท้ายตัวแปรเดิมเปลี่ยนระยะความลึกการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณ 3.1% แสดงในรูปที่ 30(d-1) และ รูปที่ 30(d-2) การเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตัดขอบเรียบจะได้ว่าแรงจากการทดลองและแรงจากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณของแรงจากการจำลองและการทดลองประมาณ 2.8% 2.5% 3.5% และ 2.6% ตามลำดับแสดงรูปที่ 31(a) รูปที่ 31(b) รูปที่ 31(c) และ รูปที่ 31(d)

S_{a1}, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 1.5 mm		S_{a1}, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 2.3 mm	
FEM	EXP	FEM	EXP
(a-1) 	(a-2) 	(b-1) 	(b-2)
a_s = 0.27, b_s = 1.46, c_s = 0.22, d_s =1.33, e_s = 0.02	a_e = 0.29, b_e = 1.42 c_e = 0.30,d_e =1.25, e_e = 0.02	a_s = 0.27, b_s = 2.72, a_s = 0.01,	a_e = 0.29, b_e = 2.70 b_e = 0.01
S_{a1}, D_{sh}: 0.5 mm, P_{st1}: 3 mm		**S_{O1}, D_{sh}: 0.3 mm, P_{st1}: 2.3 mm**	
FEM	EXP	FEM	EXP
(c-1) 	(c-2) 	(d-1) 	(d-2) 
a_s = 0.20, b_s= 1.89, c_s = 0.98	a_e = 0.22, b_e= 1.87, c_e = 1.10	a_s = 0.03, b_s = 2.85, e_s = 0.12,	a_e = 0.04, b_e = 2.83 c_e = 0.13

1 mm

a_s, a_e = ส่วนโค้งมนบน, b_s, b_e = ส่วนเรียบตรงบน, c_s, c_e = รอยแตก,
d_s, d_e = ส่วนเรียบตรงล่าง, e_s, e_e = ส่วนโค้งมนล่าง

รูปที่ 30 เปรียบเทียบผิวชิ้นงานในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2
(Cl_s : 1%t, 3%t และ 5%t, Cl_{sh}: 0%t)



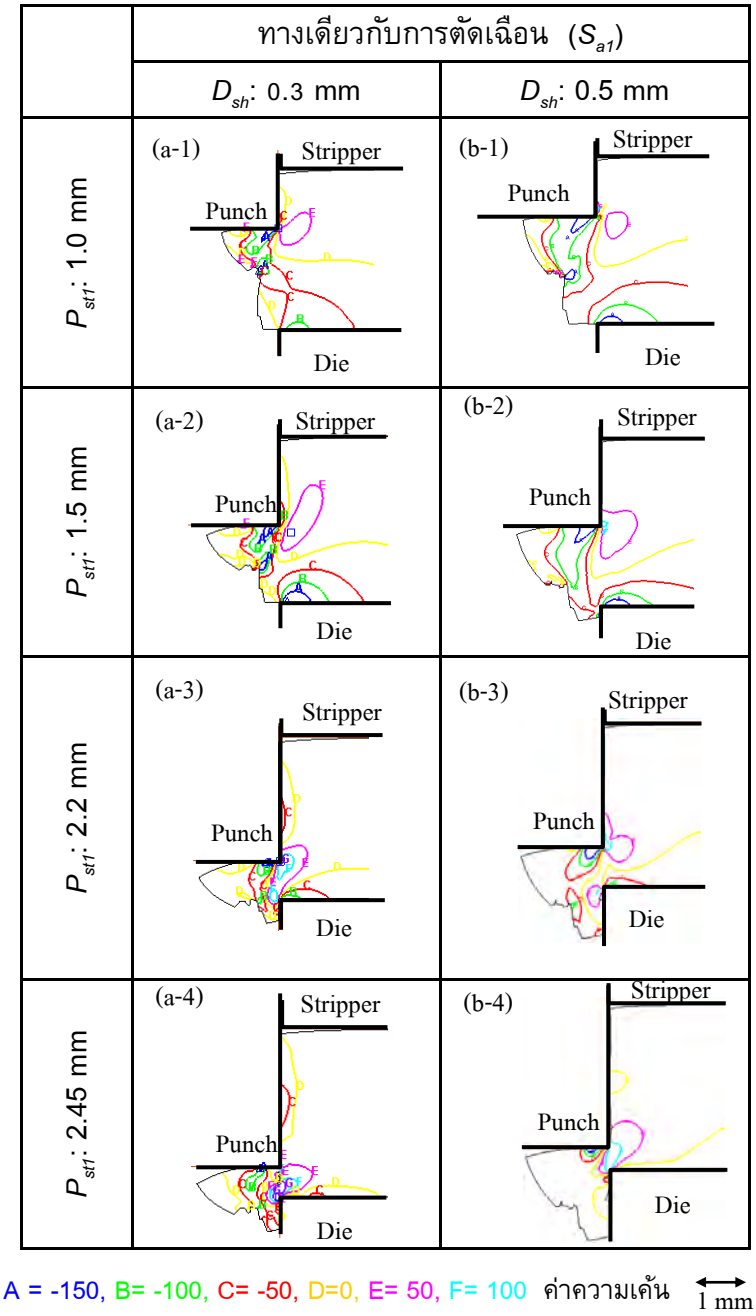
รูปที่ 31 เปรียบเทียบแรงในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 (Cl_s :1%t, Cl_{sh}: 0%t)

4.4 อิทธิพลของระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ

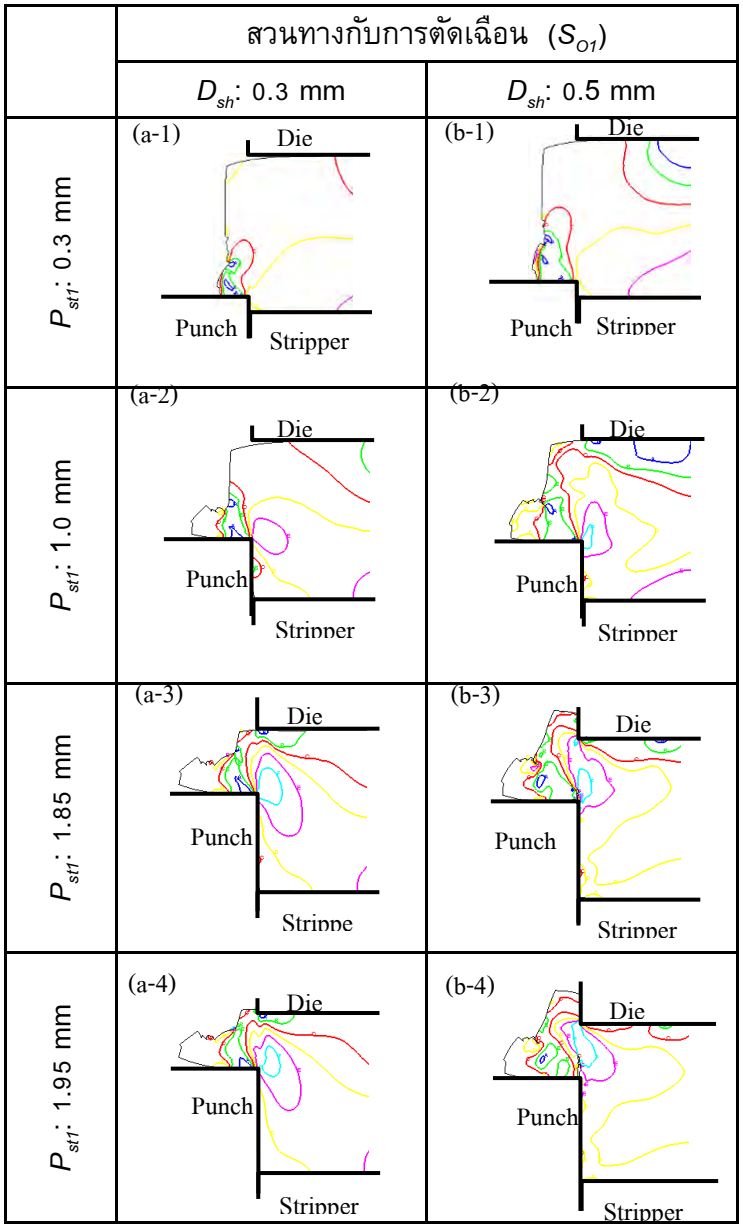
4.4.1 การตัดขอบเรียบครั้งที่ 1

การเปรียบเทียบค่าความเค้นขณะทำการตัดขอบเรียบครั้งแรก เปรียบเทียบกันระหว่างระยะเผื่อการตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน ผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ที่ 1.0 mm ลักษณะการเกิดขนาดของเศษจะมีขนาดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ค่าความเค้นที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm มีลักษณะเป็นค่าความเค้นอัดและเกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่เป็นเป็นเศษน้อยกว่าที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm แสดงในรูปที่ 32(a-1) และรูปที่ 32(b-1) เมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปได้ระยะ 1.5 mm จะเห็นว่าลักษณะของเศษที่เกิดขึ้นแตกต่างกันมากขึ้น ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm รูปที่ 32(b-2) จะเห็นว่าเศษเริ่มเคลื่อนที่ลงทำให้เกิดการตัดชิ้นงานบริเวณคมตัดดายจึงทำให้ค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดบริเวณคมตัดดายมีมากขึ้น เมื่อเทียบกับที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm รูปที่ 32(a-2) เพราะเศษจะเคลื่อนที่ออกไปทางด้านข้างมากกว่า และเมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปได้ระยะ 2.2 mm ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm รูปที่ 32(a-3) จะเห็นว่าเศษเริ่มเคลื่อนที่ลงทำให้เกิดการตัดชิ้นงานบริเวณคมตัดดาย ในขณะที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm รูปที่ 32(b-3) ชิ้นงานเกิดการตัดจากคมตัดดายจนกระทั่งใกล้จะเกิดการแตกบริเวณคมตัดพันช์แล้ว และเมื่อเคลื่อนที่ไปถึงระยะ 2.45 mm ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm รูปที่ 32(a-4) เกิดความเค้นที่มากจนใกล้จะเกิดการแตก ในขณะที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm รูปที่ 32(b-4) เกิดการแตกจนชิ้นงานใกล้หลุดออกจากกันแล้ว การเปรียบเทียบค่าความเค้นขณะทำการตัดขอบเรียบครั้งแรกเปรียบเทียบกันระหว่างระยะเผื่อการตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน ผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ที่ 0.3 mm ลักษณะการเกิดขนาดของเศษจะมีขนาดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ค่าความเค้นที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm มีลักษณะเป็นค่าความเค้นอัดและเกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่เป็นเป็นเศษน้อยกว่าที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm แสดงในรูปที่ 33(a-1) และรูปที่ 33(b-1) เมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปได้ระยะ 1.0 mm จะเห็นว่าลักษณะของเศษที่เกิดขึ้นแตกต่างกันมากขึ้น ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm รูปที่ 33(b-2) จะเห็นว่าเศษเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นซึ่งเป็นการดัดชิ้นงานกลับทำให้เกิดการตัดชิ้นงานบริเวณคมตัดดายจึงทำให้ค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดบริเวณคมตัดดายมีมากขึ้น เมื่อเทียบกับที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm รูปที่ 33(a-2) เพราะเศษจะเคลื่อนที่ออกไปทางด้านข้างมากกว่า และเมื่อพันช์เคลื่อนที่ไปได้ระยะ 1.85 mm ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm รูปที่ 33(a-3) จะเห็นว่าเศษเพิ่งเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นซึ่งเป็นการดัดชิ้นงานกลับทำให้เกิดการตัดชิ้นงานบริเวณคมตัดดาย ในขณะที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm รูปที่ 33(b-3) ชิ้นงานเกิดการตัดจากคมตัดดายจนกระทั่งใกล้จะเกิดการแตกบริเวณคมตัดพันช์แล้ว และเมื่อเคลื่อนที่ไปถึงระยะ 1.95 mm ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm รูปที่ 33(a-4) เกิดความเค้นที่มากจนใกล้จะเกิดการแตก ในขณะที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.5 mm รูปที่ 33(b-4) เกิดการแตกจนชิ้นงานใกล้หลุดออกจากกันแล้วจากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลต่อการเกิดรอยบริเวณผิวชิ้นงานที่ต่างกันด้วย จากรูปที่ 34 และ รูปที่ 35 แสดง

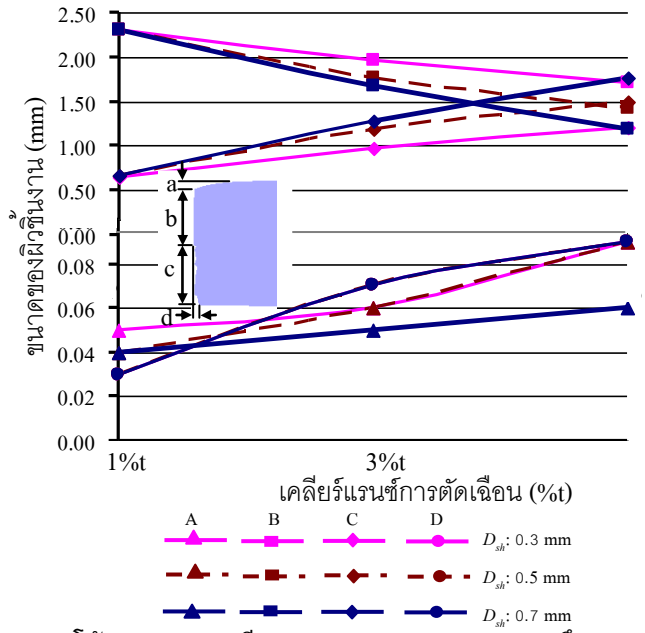
ให้เห็นว่าการตัดขอบเรียบที่ระยะเคลียร์แรนซ์น้อยจะทำให้เกิดส่วนเรียบตรงมาก แต่ส่วนโค้งมน รอยแตกและความลึกรอยแตกจะน้อย ในทางกลับกันเมื่อระยะเคลียร์แรนซ์มากขึ้นส่วนเรียบตรงที่ได้ก็จะน้อยลง แต่ส่วนโค้งมน รอยแตกและความลึกรอยแตกจะมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทิศทางในการเคลื่อนที่ต่างกันการเคลื่อนที่สวนทางกับการตัดเฉือนจะให้ส่วนเรียบตรงที่มากกว่าการเคลื่อนที่ทางเดียวกับการตัดเฉือน นอกจากนี้แรงที่ใช้ในการตัดเฉือนที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 1%t มีค่ามากกว่า ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ 3%t และ 5%t แสดงในรูปที่ 36 เมื่อทำการตัดขอบเรียบแล้วชิ้นงานที่ได้จะมีค่าความเครียดตกค้างอยู่ เนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนรูปในช่วงของพลาสติก และค่าความเครียดนี้จะมีค่าต่างกันตามระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ต่างกัน ในทิศทางการตัดขอบเรียบที่เคลื่อนที่ทางเดียวกับการตัดเฉือนและสวนทางกับการตัดเฉือน แสดงในรูปที่ 37(a-2) และ รูปที่ 38(a-2) เป็นระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.5 mm จะมีบริเวณที่กว้างกว่าระยะเผื่อการตัดขอบเรียบระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm แสดงในรูปที่ 37(a-1) และรูปที่ 38(a-1) เพราะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบการดัดเกิดขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่มากกว่าจะส่งผลต่อบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปมีบริเวณแคบทำให้ส่วนเรียบตรงที่ได้มีค่าน้อยดังแสดงในรูปที่ 37(a-3) และรูปที่ 38(a-3) และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลต่อการตัดขอบเรียบครั้งต่อไป



รูปที่ 32 การเปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน (Cl_s : 1%t, Cl_{sh} : 0%t)

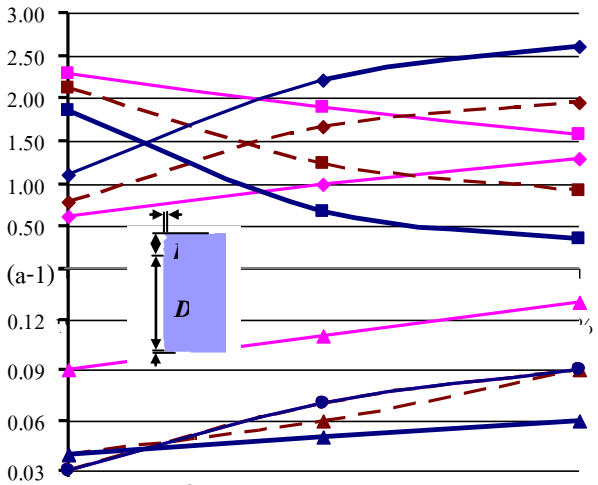


รูปที่ 33 การเปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน (Cl_s: 1%t, Cl_{sh}: 0%t)

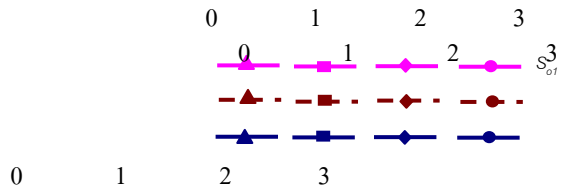


a: ส่วนโค้งมน, b: ส่วนเรียบตรง, c: รอยแตก, d: ความลึกรอยแตก

รูปที่ 34 เปรียบเทียบขนาดผิวชิ้นงานการตัดขอบเรียบในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน (Cl_{sh} : 0%t)

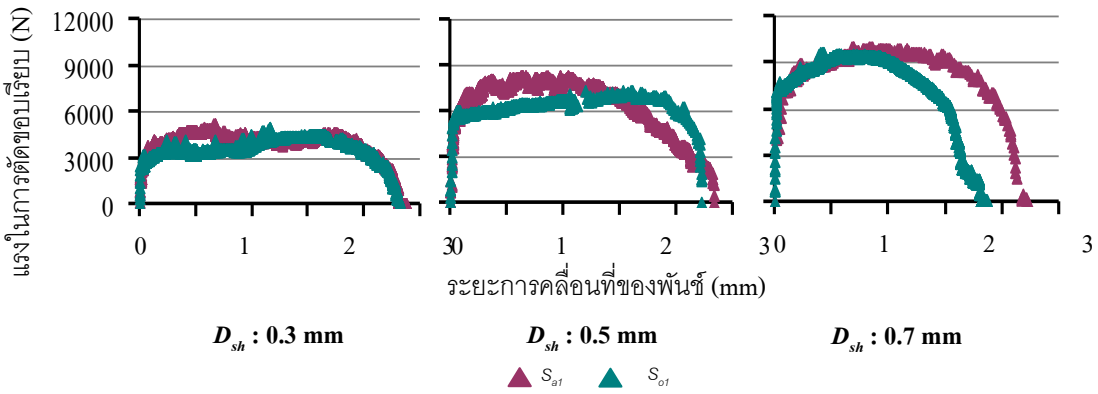


รปที่ 36 เปรียบเทียบแรงจากการตัดขอบ

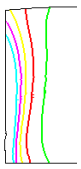
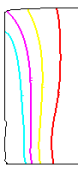


0 1 2 3

D_{sh} : 0.3 mm

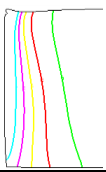


รูปที่ 36 เปรียบเทียบแรงจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (Cl_s : 1%t, Cl_{sh} : 0%)

างเดียวกับการตัดเฉือน (S_{a1})		
D_{sh} : 0.3	D_{sh} : 0.5	D_{sh} : 0.7
(a-1)	(a-2)	(a-3)
		

A = 0, B= 0.24, C=0.48, D=0.72, E=0.96 ค่าความเครียด 1 mm

รูปที่ 37 เปรียบเทียบค่าความเครียดของการตัดขอบเรียบที่ 1 ในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน (Cl_s:1%t, Cl_{sh}:0%t)

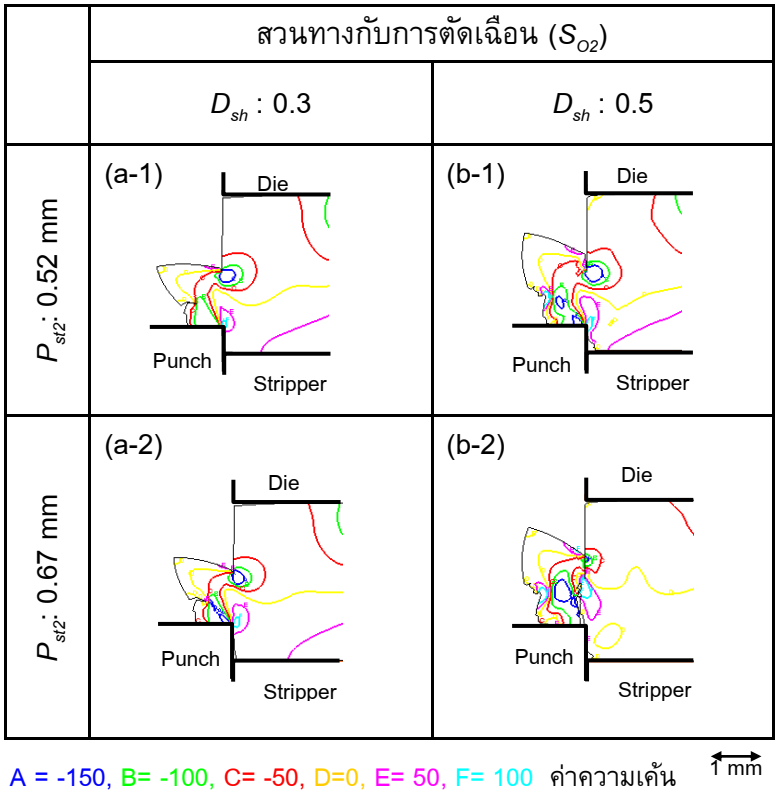
สวนทางกับการตัดเฉือน (S_{o1})		
D_{sh} : 0.3	D_{sh} : 0.5	D_{sh} : 0.7
(a-1)	(a-2)	(a-3)
		

A = 0, B= 0.24, C=0.48, D=0.72, E=0.96 ค่าความเครียด 1 mm

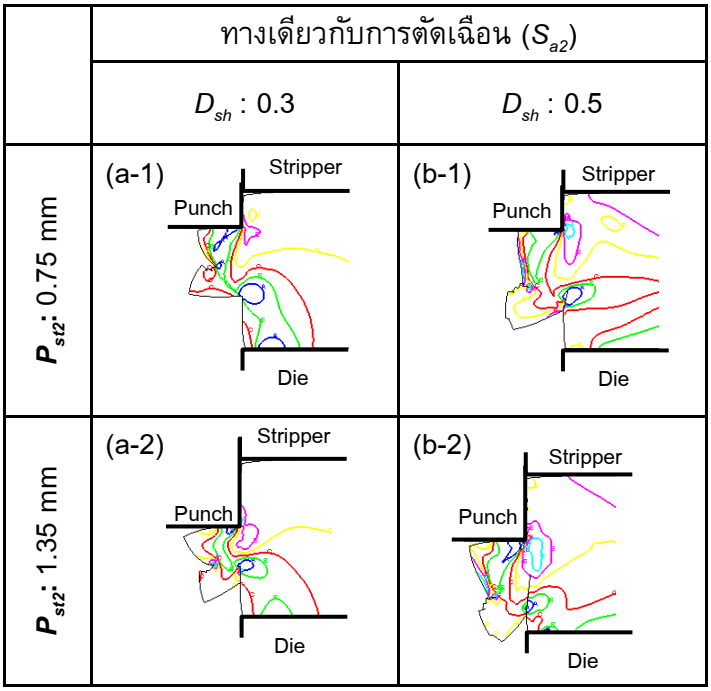
รูปที่ 38 เปรียบเทียบค่าความเครียดของการตัดขอบเรียบที่ 1 ในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน (Cl_s:1%t, Cl_{sh}:0%t)

4.4.2 การตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

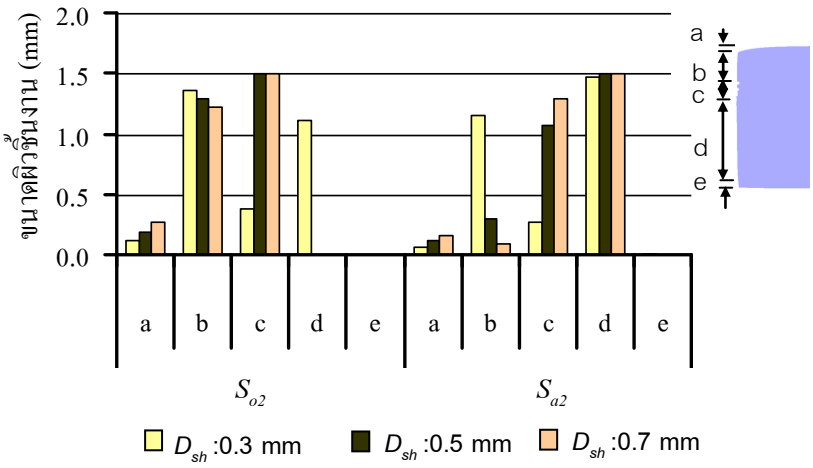
ในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 เปรียบเทียบระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm และ 0.5 mm ในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ที่ 0.52 mm พันช์เคลื่อนที่ในทิศสวนทางกับการตัดเฉือนพันช์เคลื่อนที่ตัดชิ้นงานจากบริเวณที่มีเศษเล็กไปหาบริเวณที่มีเศษใหญ่ ลักษณะการไหลของเศษจึงง่ายขึ้น แต่เมื่อระยะเผื่อการตัดขอบเรียบมากขึ้นก็จะทำให้เนื้อบริเวณเศษมากขึ้นไปด้วย จึงส่งผลให้เกิดความเค้นอัดบริเวณเศษมากกว่าและความเค้นดึงบริเวณผิวชิ้นงานที่มากกว่าเช่นกัน แสดงในรูปที่ 39(a-1) และ รูปที่ 39(b-1) และเมื่อพันช์เคลื่อนที่มากขึ้นจนถึงระยะที่ 0.67 mm ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.5 mm เศษของชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ขึ้นตามการเคลื่อนที่ของพันช์จึงทำให้เกิดความเค้นมากจนกระทั่งเกิดการแตก แสดงในรูปที่ 39(a-2) ส่วนที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm จะเห็นว่าเศษยังสามารถดัดงอขึ้นตามการเคลื่อนที่ของพันช์ได้จึงส่งผลให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยชิ้นงานยังไม่เกิดรอยแตกที่ระยะนี้ แสดงในรูปที่ 39(b-2) ส่วนการตัดขอบเรียบในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือนในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ที่ 0.75 mm จะเห็นว่าพันช์เคลื่อนที่ตัดชิ้นงานจากบริเวณที่มีเศษใหญ่ไปหาบริเวณที่มีเศษเล็ก ลักษณะการไหลของเศษจึงยากขึ้น และเมื่อระยะเผื่อการตัดขอบเรียบมากขึ้นก็จะทำให้เนื้อบริเวณเศษมากขึ้นไปด้วย จึงส่งผลให้เกิดความเค้นอัดบริเวณเศษมากกว่าและความเค้นดึงบริเวณผิวชิ้นงานที่มากกว่าเช่นกัน แสดงในรูปที่ 40(a-1) และ รูปที่ 40(b-1) และเมื่อพันช์เคลื่อนที่มากขึ้นจนถึงระยะที่ 1.35 mm ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.5 mm เศษของชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ขึ้นตามการเคลื่อนที่ของพันช์ จึงทำให้เกิดความเค้นมากจนกระทั่งเกิดการแตก แสดงในรูปที่ 40(a-2) ส่วนที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm เศษยังสามารถดัดงอขึ้นตามการเคลื่อนที่ของพันช์ได้ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยชิ้นงานยังไม่เกิดรอยแตกที่ระยะนี้ แสดงในรูปที่ 40(b-2)จากเหตุผลข้างต้นจึงส่งผลให้ผิวงานตัดที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบ 0.3 mm ให้ส่วนเรียบตรงที่มากกว่า ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 0.5 mm และ 0.7 mm แสดงดังรูปที่ 41 และยังส่งผลให้แรงที่เกิดมีค่าต่างกันด้วยจะเห็นว่าที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่มากกว่าแรงที่ใช้ในการตัดก็จะมากตามไปด้วย และเนื่องจากชิ้นงานเกิดการแตกหักก่อนที่ระยะประมาณ 1 mm จึงทำให้แรงในการตกลงมา ในขณะที่แรงของการตัดที่ระยะเผื่อเรียบ 0.3 mm จะตกลงที่ระยะประมาณ 1.5 mm แสดงดังรูปที่ 42



รูปที่ 39 การเปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน (Cl_s: 1%t, Cl_{sh}: 0%t, P_{st1}: 1.5 mm)

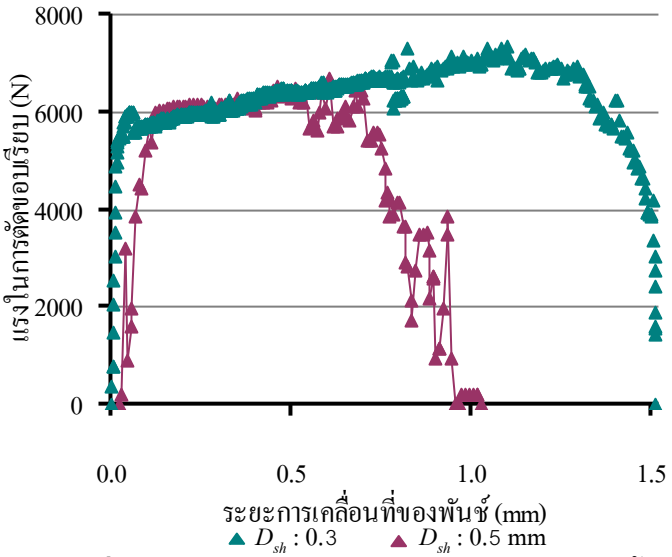


รูปที่ 40 การเปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน (Cl_s : 1%t, Cl_{sh} : 0%t, P_{st1}: 1.0 mm)



a: ส่วนโค้งมนบน, b: ส่วนเรียบตรงบน, c: รอยแตก, d: ส่วนเรียบตรงล่าง, e: ส่วนโค้งมนล่าง

รูปที่ 41 เปรียบเทียบผลการตัดเรียบครั้งที่ 2 (Cl_s: 1%t, Cl_{sh} : 0%t, P_{sh1} : 1.5 mm)



รูปที่ 42 เปรียบเทียบแรงจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

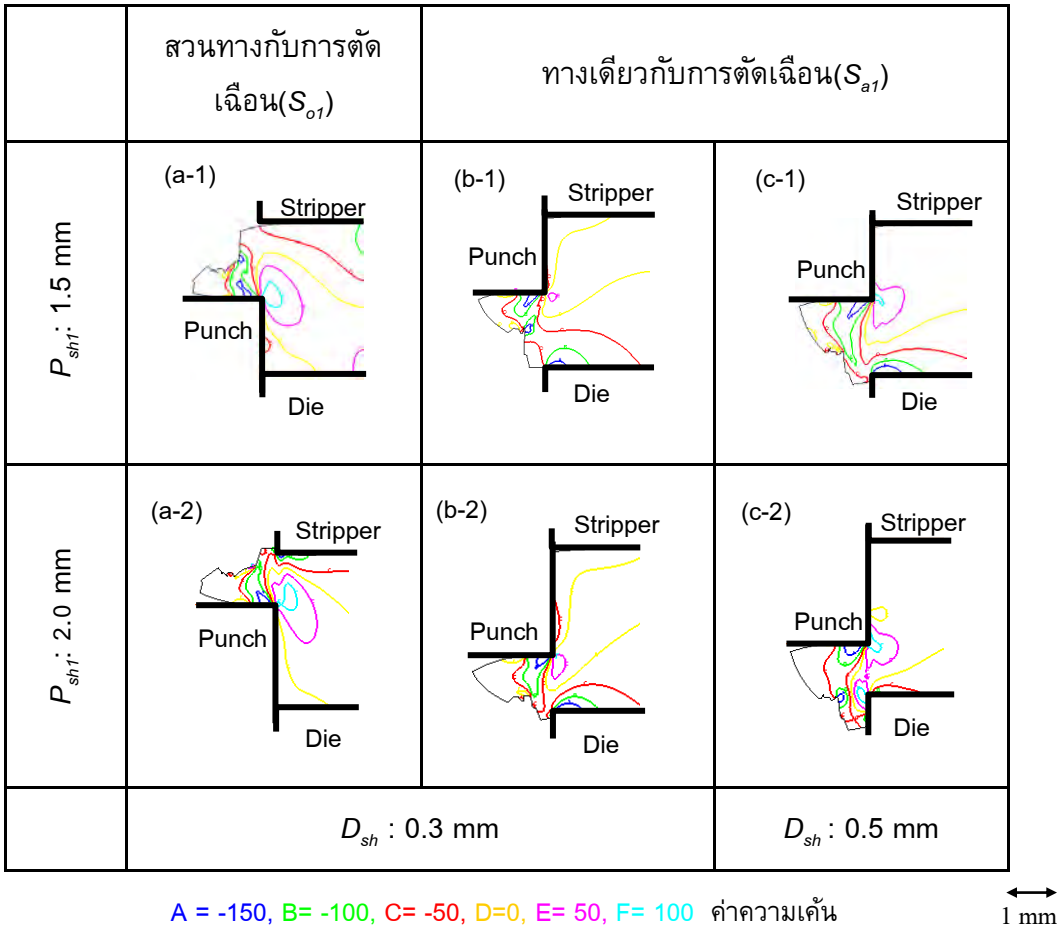
(Cl_s:1%t , Cl_{sh} :0%t, P_{st1}: 1.5 mm)

4.5 อิทธิพลของระยะความลึกของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1

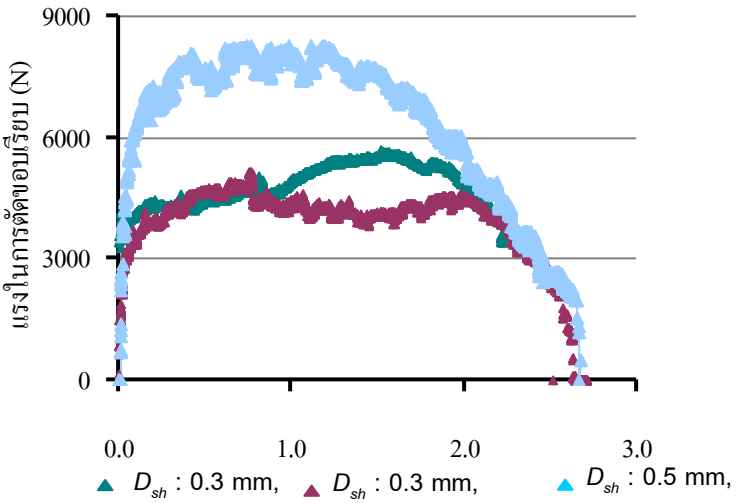
4.5.1 การตัดขอบเรียบครั้งที่ 1

การเปรียบเทียบค่าความเค้นขณะทำการตัดขอบเรียบครั้งแรก เปรียบเทียบกันระหว่างระยะความลึกของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 การตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดเฉือน ผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ที่ 1.5 mm เศษที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเล็กและถูกดันออกไปทางด้านข้างจึงทำให้ค่าความเค้นดึงและอัดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่มากนักแสดงในแสดงในรูปที่ 43(a-1) จนกระทั่งพันช์เคลื่อนที่ถึงระยะ 2.0 mm

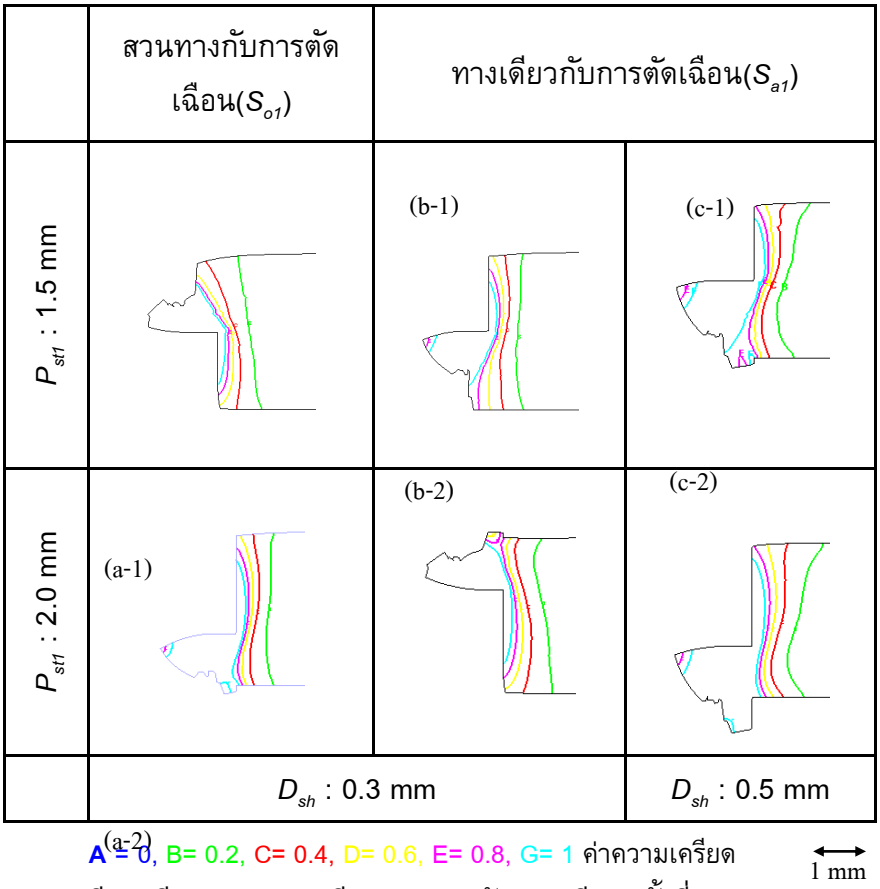
จะเกิดค่าความเค้นดึงขึ้นจนทำให้เกิดลักษณะคล้ายกับการดัดขึ้นจนทำให้ชิ้นงานถูกดันกลับไปสัมผัสกับผิวของดาย แสดงในรูปที่ 43(a-2) ส่วนการเคลื่อนที่พันช์ทางเดียวกับการตัดเฉือนซึ่งเป็นการตัดจากเศษที่มีขนาดใหญ่ไปเล็กจึงทำให้เกิดค่าความเค้นอัดและเกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่เป็นเป็นเศษมากเมื่อระยะความลึกการตัดขอบเรียบมากขึ้นค่าความเค้นอัดและดึงก็จะมากขึ้นตามไปด้วย แสดงในรูปที่ 43(b-1) และรูปที่ 43(b-2) ที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่มาก ระยะความลึกของพันช์ในการตัดขอบเรียบที่ 1.5 mm เริ่มเกิดความเค้นดึงและความเค้นอัดขึ้นแล้วเนื่องจากเศษที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้เศษถูกดันไปด้านล่างตามระยะความลึกของพันช์ซึ่งชิ้นงานเกิดค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดที่มากจนเกิดการแตก แสดงในรูปที่ 43(c-1) และรูปที่ 43(c-2)จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 แสดงในรูปที่ 44 ค่าความเครียดนี้จะมีค่าต่างกันตามระยะความลึกของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ในการตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดขอบเรียบเมื่อเปรียบเทียบการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ที่ระยะพันช์เคลื่อนที่ 1.5 mm ชิ้นงานมีขนาดเศษที่เล็กจึงมีการไหลของเศษไปด้านข้างมากค่าความเครียดจึงยังไม่เกิดครอบครุมบริเวณเศษ เมื่อเทียบกับระยะความลึกของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ที่ระยะพันช์สโตรก 2.0 mm ชิ้นงานถูกดัดกลับไปสัมผัสกับดายจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจึงเกิดได้ครอบบริเวณเศษทั้งหมดแสดงในรูปที่ 45(a-1) และรูปที่ 45(a-2) เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ในทางเดียวกับการตัดเฉือนจะเห็นว่าลักษณะความเครียดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกับการเคลื่อนที่แบบสวนทางกับการตัดเฉือนแต่ค่าความเครียดที่ได้จะให้ขนาดที่ครอบครุมบริเวณเศษมากกว่าเพราะชิ้นงานถูกคมตัดด้วยคมตัดของดายเร็วกว่า แสดงในรูปที่ 45(b-1) และรูปที่ 45(b-2) และเมื่อเทียบกับระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่มากกว่าจะเห็นได้ชัดว่าชิ้นงานที่ถูกตัดด้วยคมตัดของดายมากจะเกิดค่าความเครียดที่ครอบเศษมากตามไปด้วย แสดงในรูปที่ 45(c-1) และรูปที่ 45(c-2)



รูปที่ 43 การเปรียบเทียบค่าความเค้นของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (CI_s : 1%t, CI_{sh} : 0%t)



รูปที่ 44 เปรียบเทียบแรงจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (CI_s : 1%t , CI_{sh}: 0%t)

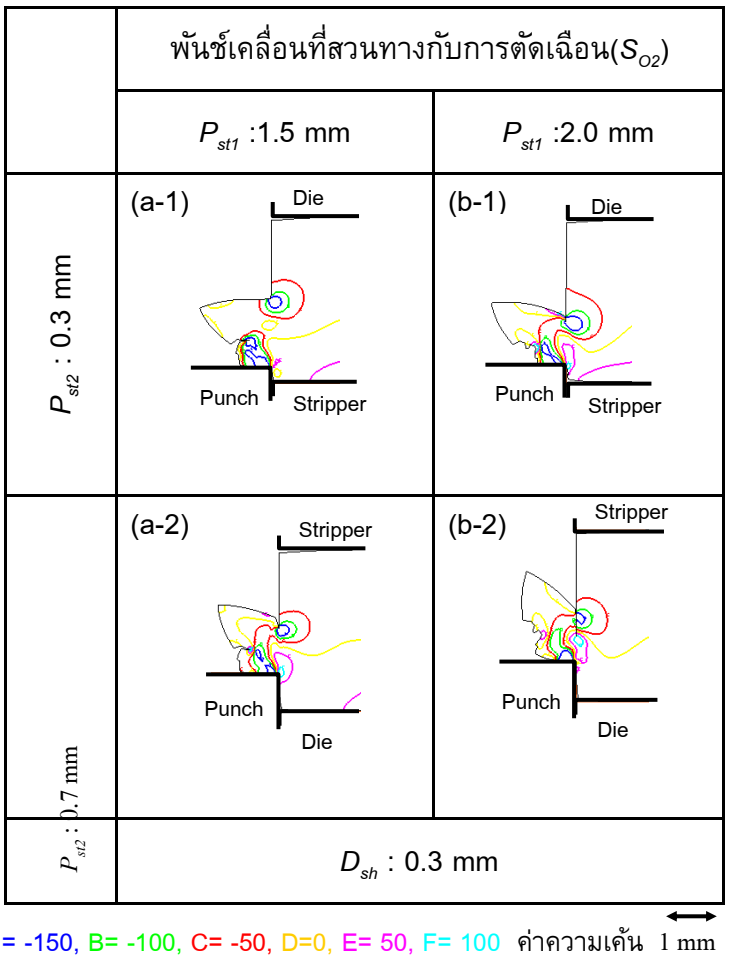


รูปที่ 45 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 (Cl_s : 1%t, Cl_{sh} : 0%t)

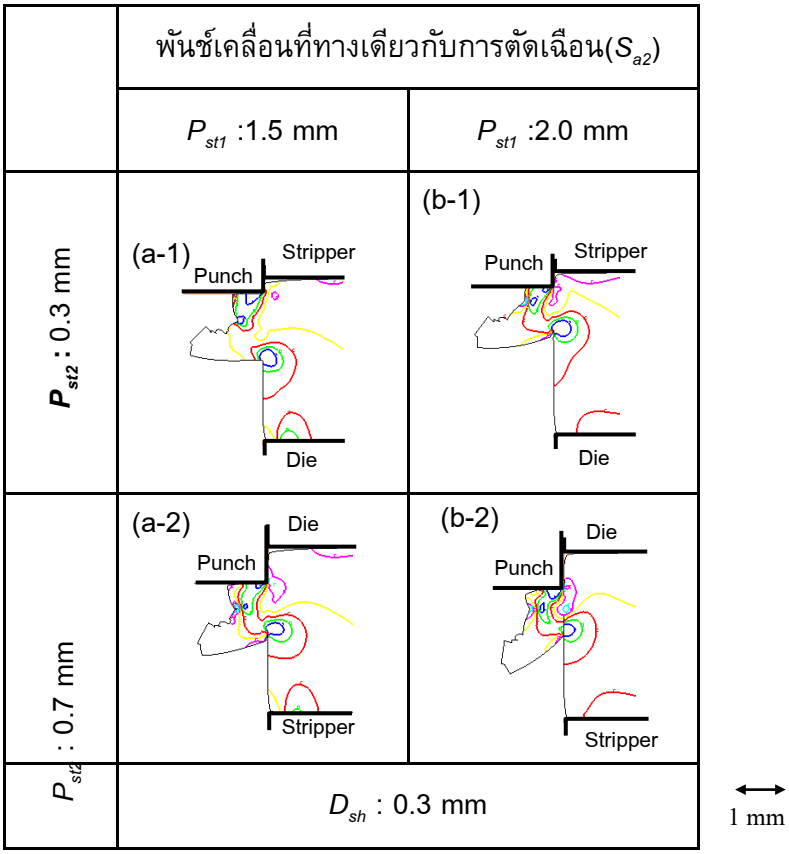
4.5.2 การตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

ทิศทางการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 แบบทางเดียวกับการตัดเฉือนและสวนทางกับการตัดเฉือน ระยะการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm เปรียบเทียบที่ระยะการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ต่างกัน คือ 1.5 mm และ 2.0 mm จะเห็นว่าเมื่อทำการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 เศษจะมีลักษณะของเศษจากน้อยไปมาก การเคลื่อนที่พันช์สวนทางกับการตัดเฉือน ที่ระยะ 0.3 mm ที่ระยะการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ที่ 1.5 mm แสดงในรูปที่ 46(a-1) และ 47(a-1) ลักษณะของเศษยังสามารถไหลออกไปทางด้างข้างได้จึงยังไม่ดันเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดที่ได้จึงน้อยเมื่อเทียบกับที่ระยะการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ที่ 2.0 mm แสดงในรูปที่ 46(b-1) และ 47(b-1) เศษที่เกิดขึ้นไม่สามารถไหลออกไปทางด้านข้างได้ จึงดันเศษที่เกิดจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ให้เกิดการดัดงอขึ้นไปค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจึงมากและเมื่อเคลื่อนที่พันช์ไปถึงระยะที่ 0.7 mm ลักษณะเศษที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 1.5 mm แสดงในรูปที่ 46(a-2) และ 47(a-2) เศษจากคมตัดของพันช์เริ่มดันเศษจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 จนเกิดการดัดงอ ในขณะที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 3.0 mm แสดงในรูปที่ 46(b-2) และ 47(b-2) เศษถูกตัดด้วยคมตัดของพันช์มากขึ้นและเศษก็ถูกดันให้เกิดการดัดงอมากขึ้นด้วยเช่นกันค่าความเค้นที่เกิดเริ่มมากขึ้น แต่เมื่อระยะการตัดขอบเรียบที่ 0.3 mm ระยะการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ที่ 1.5 mm มีขนาดของเศษที่มากขึ้นจึงทำให้เศษไปดันเศษจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1

อย่างรวดเร็ว แสดงในรูปที่ 48(a-1) และเศษจะเกิดการแตกที่ระยะการเคลื่อนที่ของพันช์ 0.7 mm แสดงในรูปที่ 48(b-1) เมื่อเทียบกับระยะการตัดขอบเรียบที่ 2.0 mm เนื่องจากเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 มีขนาดแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แสดงในรูปที่ 48(c-1) และ รูปที่ 48(c-2) จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว แสดงในรูปที่ 49(a-2) และเศษก็จะหลุดออกไปที่ระยะการเคลื่อนที่ 0.7 mm แสดงในรูปที่ 49(b-2) จากเหตุผลข้างต้นจะเห็นว่าชิ้นงานที่ระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 1.5 mm จะมีรอยแตกที่มากกว่าระยะเผื่อการตัดขอบเรียบที่ 2.0 mm แสดงในรูปที่ 1.50 และเมื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตัดแต่ละตัวจะเห็นว่าแนวโน้มที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกัน จะแตกต่างกันที่ระยะห่างของช่วงสุดท้ายก่อนเกิดการแตก

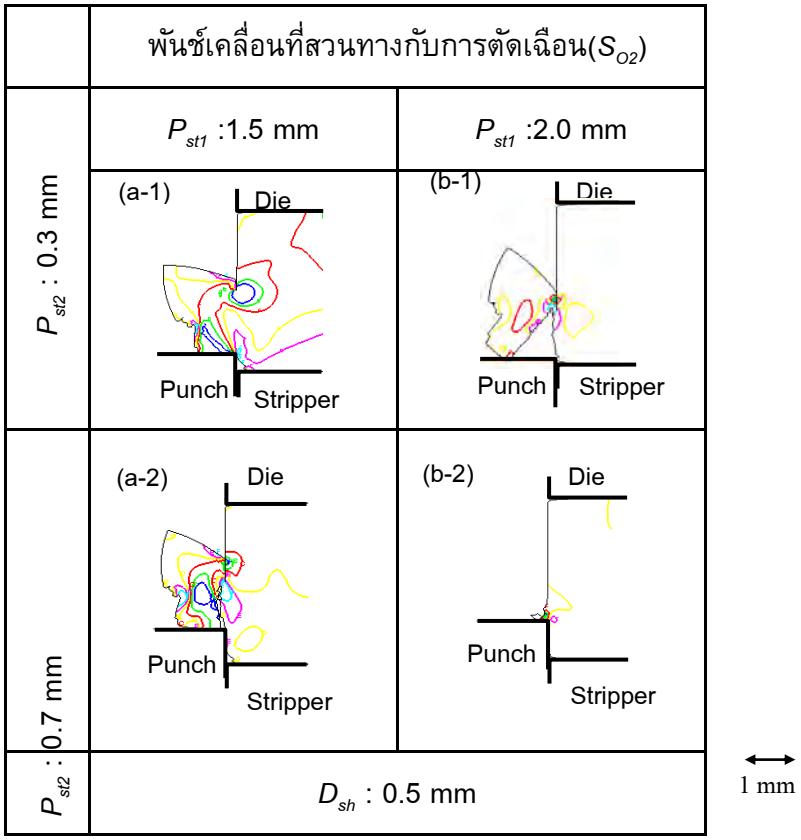


รูปที่ 46 การเปรียบเทียบค่าความเค้นในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 (Cl_s: 1%t, Cl_{sh}: 0%t, D_{sh}: 0.3 mm)

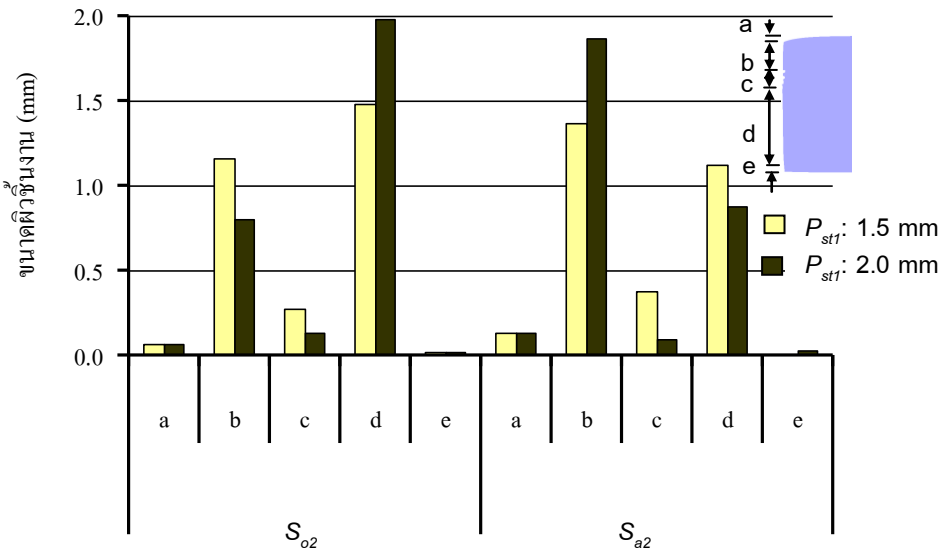


รูปที่ 47 การเปรียบเทียบค่าความเค้นในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2

(Cl_s: 1%t, Cl_{sh}: 0%t, D_{sh} :0.3 mm)

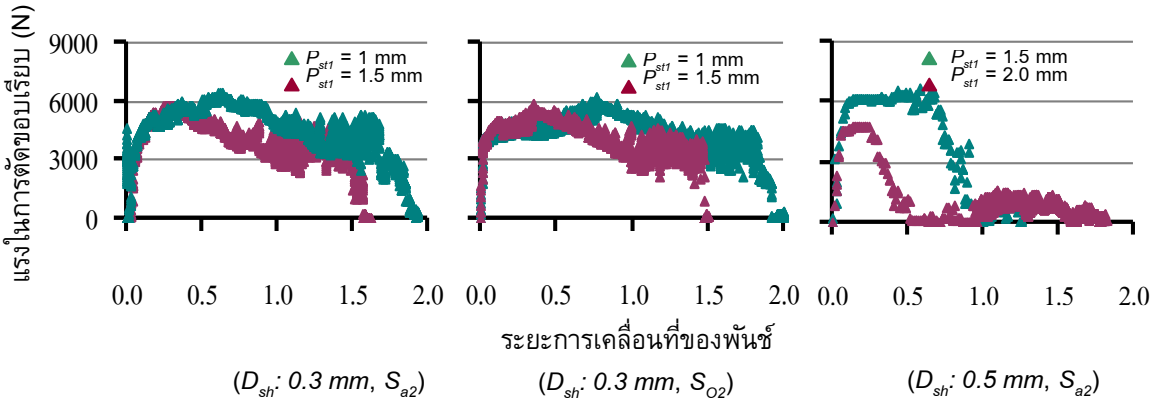


รูปที่ 48 การเปรียบเทียบค่าความเค้นในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 (Cl_s: 1%t, Cl_{sh}: 0%t, D_{sh} :0.5 mm)



a: ส่วนโค้งมนบน, b: ส่วนเรียบตรงบน, c: รอยแตก, d: ส่วนเรียบตรงล่าง, e: ส่วนโค้งมน

รูปที่ 49 เปรียบเทียบผลการตัดเรียบครั้งที่ 2 (Cl_s: 1%t และ 3%t, Cl_{sh}: 0%t, D_{sh} :0.3 mm)



รูปที่ 50 เปรียบเทียบแรงจากการตัดขอบเรียบครั้งที่ 2 (Cl_s : 1%t , Cl_{sh}: 0%t)

5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแก้ไขปัญหาการเกิดรอยแตกและครีบ เพื่อเพิ่มคุณภาพผิวรอยตัดและคุณภาพชิ้นงานตัด จากการศึกษาพบว่ากระบวนการตัดโลหะแผ่นขอบเรียบดันกลับซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดรอยแตกและครีบได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องมีการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการให้เหมาะสม นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของทิศทางการตัดขอบเรียบ จากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองกระบวนการตัดโลหะแผ่นขอบเรียบเพื่อศึกษาอิทธิพลของทิศทางการตัดขอบเรียบ พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 ในการตัดขอบเรียบในทิศสวนทางกับการตัดเฉือนจะเกิดการดัดของชิ้นงานขึ้นและทำให้เกิดค่าความเค้นดึงได้ง่ายกว่าการตัดขอบเรียบแบบทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน และสมบัติของผิวชิ้นงานที่ได้จะมีคุณภาพที่ดีขึ้นทั้งความแข็งและความเรียบผิวการตัดขอบเรียบในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือนและสวนทางกับการตัดเฉือน นอกจากนี้ถ้านำไปเทียบกับการตัดเฉือนการตัดขอบเรียบทั้งสอบแบบให้ค่าความแข็งและความเรียบผิวให้ค่าที่ดีกว่าการตัดเฉือน การตัดขอบเรียบในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือนพบว่าการแตกของชิ้นงานจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการตัดขอบเรียบในทิศทางสวนทางกับการตัดเฉือน เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองผลจำลองที่ได้สอดคล้องกันกับผลการทดลอง อย่างไรก็ตามการนำกระบวนการตัดโลหะแผ่นขอบเรียบดันกลับมาประยุกต์ใช้นั้นจะต้องคำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของกระบวนการ เช่น ช่องว่างแม่พิมพ์ของขั้นตอนการตัดเฉือน ระยะเผื่อตัดเรียบ ช่องว่างแม่พิมพ์ของขั้นตอนการตัดเรียบ ทิสทางการตัดเรียบ ระยะการตัดขอบเรียบครั้งที่ 1 เป็นต้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการตัดขอบเรียบดันกลับสามารถนำมาแก้ปัญหาการเกิดรอยแตกและครีบบนชิ้นงานได้ โดยต้องมีการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสม

6. ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย

6.1 International journal

S. Thipprakmas and W. Phanitwong: *Finite element analysis of shaving direction effects in reciprocating shaving process*, Steel Research International, Volume 81(9) (2010), Pages 1058-1061.

7. ภาคผนวก

7.1 Reprint of Steel Research International, Volume 81(9) (2010), Pages 1058-1061

S. Thipprakmas and W. Phanitwong: *Finite element analysis of shaving direction effects in reciprocating shaving process*, Steel Research International, Volume 81(9) (2010), Pages 1058-1061.

steel research international

Volume 81, Number 9
Special Edition 2010
Including computer files

Edited by
K. Mori, M. Pietrzyk,
J. Kusiak, J. Majta,
P. Hartley, J. Lin

User information click here

Publishing Company Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Finite Element Analysis of Shaving Direction Effects in Reciprocating Shaving Process

Sutasn Thipprakmas[1], Wiriyakorn Phanitwong[2]

[1] Department of Tool and Materials Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok / Thailand, sutasn.thi@kmutt.ac.th; [2] Department of Tool and Materials Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok / Thailand

In a precision sheet metal cutting process, the major problems encountered are the crack and burr formations. Further operations are required to eliminate these formations, which increase the production cost and time. In the reciprocating shaving process, the workpiece is half-shaved and then shaved again in the opposite direction. This process could be fabricated to produce a smooth-cut surface without any crack and burr formations. However, the shaving direction effects were not investigated. In the present study, the finite element method was used and laboratory experiments were performed to clarify the shaving direction effects. The shaving direction effects could be theoretically clarified on the basis of stress and strain distributions. The bending feature was a result of the half-shaving in the reverse shearing direction. Thus, tensile stress on the half-shaved workpiece increased and crack formations occurred. In addition, the roughness and hardness of the surface half-shaved were higher in comparison to the sheared surface. However, the roughness and hardness of the half-shaved surface were rarely affected by the half-shaving direction. The bending feature was generated to some extent on the shaving operation. However, it was easily generated in the case of shaving in the parallel shearing direction. The finite element simulation results were validated by the laboratory experiments. It was found that the results corresponded suitably with the experimental results.

Keywords: Shearing, Blanking, Shaving, Crack, Burr, Finite element method

Introduction

In a conventional sheet metal cutting process, the quality of the product, especially the dimensional accuracy, generally degrades with the occurrence of crack and burr formations. Moreover, burr formation could result in injury to the operators, especially those working in industries involving consumer goods and sanitary products. Thus, further processing such as grinding is required to eliminate the crack and burr formations. However, this results in an increase in the production cost and time. It is very difficult to prevent crack and burr formations, which is the main barrier faced in product quality upgrading in the sheet metal cutting process. Earlier researches, used the Finite Element Method and experiments for investigating the technique in order to increase the productivity as well as improve product quality [1-11]. The counterblanking process has been investigated. It involves half-blanking and then separating the product by pushing it in the opposite direction. Further, the relationship between the blanking conditions and the products has also been studied [6,7]. In addition, the shaving process, where a cut surface without any crack formation could be achieved has been investigated [8-10]. With the advantages of these processes, crack and burr formations could be prevented on the counterblanking process, and on the shaving process, respectively. Thus, the main concepts of counterblanking and shaving processes were integrated into a reciprocating shaving process to meet the requirement of a crack- and burr-free cut surface. In this process, the workpiece was half-shaved and then the shaving was again done in the reverse direction [11]. With suitable application of the working process parameters, the reciprocating process could manufacture a crack- and burr-free cut surface.

In the present study, the shaving direction effects were dived into theoretical investigation and clarification in order to understand the complete process. FEM simulation was used as a tool to investigate the shaving direction effects, and laboratory experiments were performed to validate the results. The effects of half-shaving and shaving directions could be theoretically clarified on the basis of stress and strain distribution analysis. The results demonstrated that the half-shaving in the reverse shearing direction caused the bending feature. This resulted in the increase of tensile stress on the half-shaved surface and caused crack formations. In addition, the hardness and roughness on the surface half-shaved were higher than that in the sheared surface. However, the level of shaved surface roughness and hardness were similar to some extent in both half-shaving directions. In the shaving operation, the bending feature had an easy occurrence in the case of shaving in the parallel shearing direction, in comparison with the case of shaving in the reverse shearing direction. The FEM simulation results were validated by laboratory experiments and it was found that they corresponded well with the experimental results.

The FEM Simulation and Experimental Procedures

FEM Simulation Procedure. The FEM simulation model of the reciprocating shaving process is shown in **Figure 1**. The workpiece was first sheared as shown in Figure 1(a). Next, half-shaving was done on the sheared workpiece in the parallel and reverse shearing directions as shown in Figures 1(b-1) and (b-2), respectively. Finally, the workpiece was shaved again in the reverse direction of the half-shaving operation as shown in Figures 1(c-1) and (c-2), respectively. The conditions of FEM simulation, material property, and fracture criterion are shown in **Table 1**. A commercial analytical code for the two-dimensional implicit quasi static finite element method (DEFORM-2D) was used as the FEM simulation code. The FEM simulation model used in the present study was the plane strain model in which the sheet material was set as an elasto-plastic type. The punch, die, and blankholder were set as rigid types. To achieve a high accuracy predic-

tion of cut surface, approximately 5000 elements of the four-node element type were generated on the sheet material and fine element was generated on the shearing zone. Aluminum (A1100-O) was the material workpiece for which the constitutive equation and the material properties were determined from the tensile testing experiment. The normalized Cockroft&Latham equation was applied with a critical fracture value of 1.26. Thus, a good agreement was obtained between the FEM simulation results and the experimental results in the tensile testing and shearing process [11].

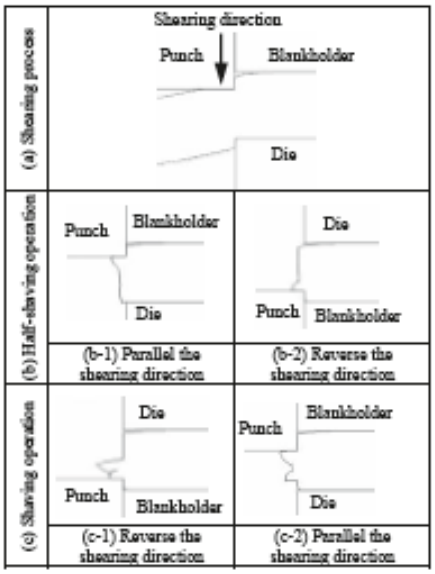


Figure 1. FEM simulation model.

Table 1. FEM simulation conditions.

Simulation model	Plane strain model
Object type	Workpiece : Elasto-plastic Punch/Die : Rigid Blankholder : Rigid
Material	A1100-O (Thickness (t): 3 mm) (σ_{ys}=102.5MPa, λ=43.5%)
Initial material shape	Length: 60 mm, Width: 35 mm
Shearing clearance (Cl_s)	1%t
Shaving clearance (Cl_{sh})	0%t
Shaving allowance (D_{sh})	0.3 mm
Cutting tool radius	All cutting tool radius: 0.01mm
Flow curve equation	$\bar{\sigma} = 153.5\bar{\varepsilon}^{0.28} + 88$
Fracture criterion equation	Normalized Cockroft&Latham
Critical fracture value (C)	1.26
Friction coefficient (μ)	0.1

Experimental Procedure. The die set used for the experiments is shown in **Figure 2**. The 50 kN universal tensile testing machine (Lloyd Instruments Ltd) was used as the press machine. Subsequent to the half-shaving and shaving operations, the cut surface was observed using an optical microscope. This was done firstly to measure the amounts of die-roll, smooth surface, and crack, and secondly to capture the cut surface feature image. In addition, the surface roughness and hardness were examined.

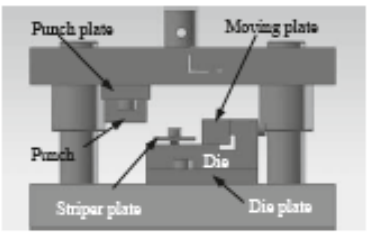


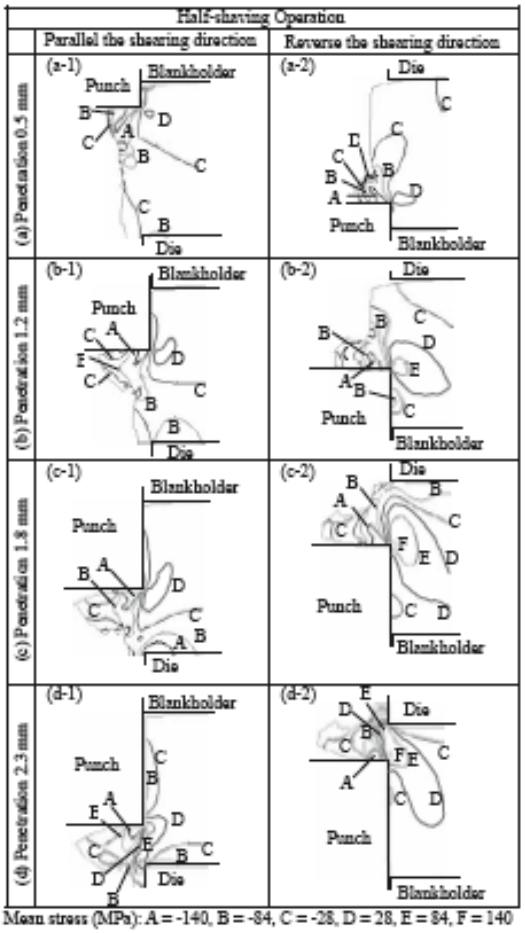
Figure 2. Die set for the experiments.

Results and Discussions

Stress Distribution on Half-Shaving Operation. With the half-shaving penetration of 0.5 mm, the FEM simulation results indicated the same level of stress distribution on both cases of parallel and reverse shearing directions as shown in **Figures 3**(a-1) and (a-2), respectively. The compressive stress was generated and directed on the half-shaved chip. It was found that when the half-shaving penetration increased to 1.2 mm, in the case of parallel shearing direction as shown in Figure 3(b-1), the half-shaved chip formation was larger. In addition, the compressive stress direction was turned slightly to the half-shaving direction. In the case of reverse shearing direction as shown in Figure 3(b-2), owing to the large half-shaved chip formation, the die-roll on the top surface was slightly pushed back to make contact with the die. This resulted in directing the compressive stress in the half-shaving direction and forming a small bending feature. The tensile stress was thus generated on the half-shaved surface. As the punch proceeded further, the compressive stress direction was turned into the half-shaving direction in the case of parallel shearing direction as shown in Figure 3(c-1). Conversely, in the case of reverse shearing direction, the bending feature was larger. This resulted in an increase of tensile stress on the half-shaved surface as shown in Figure 3(c-2). This feature caused crack formations on the half-shaved surface. With the half-shaving penetration of 2.3 mm, the same level of stress distribution was observed and the half-shaved chip was formed over the die in both cases as shown in Figures 3(d-1) and (d-2), respectively. Tensile stress was generated on the half-shaved surface. It was observed that owing to the effect of the bending feature, the generated tensile stress in the reverse shearing direction was larger in comparison to that in the parallel shearing direction. In addition, a small concave feature was observed on the top surface in the case of the reverse shearing direction.

The results indicated that stress distribution was affected by the half-shaving direction. The half-shaving with the reverse shearing direction resulted in the generation of the bending feature. The tensile stress was thus easily generated on the half-shaved surface. In addition, the crack formations were easily formed resulted in the decreasing of the maximum half-shaving penetration. As shown in

Figures 4 and 5, the maximum half-shaving penetrations were similar in some extent in the parallel and reverse shearing directions, approximately 2.6 mm, in which well corresponded with the FEM simulation results. However, in the other process parameter conditions, the maximum half-shaving penetrations in the parallel shearing direction were larger than that in the reverse shearing direction [11].



Mean stress (MPa): A = -140, B = -84, C = -28, D = 28, E = 84, F = 140

Figure 3. Stress distribution analysis with respect to the half-shaving direction (Cl_s = 1%t, Cl_{sh} = 0%t, D_{sh} = 0.3 mm).

Surface Roughness, Strain Distribution and Hardness. The cut surface features and their surface roughness values (R_a) are shown in Figure 4. The results elucidated that the half-shaved surface roughness values were similar to some extent in the parallel and reverse shearing directions. In addition, they were smaller than their sheared surface roughness values. The approximate sheared and half-shaved surface roughness values (Ra) were 0.495 μm and 0.209 μm, respectively. The strain distribution and hardness value (HV) on the sheared surface are shown in Figure 5. The initial hardness of A1100-O was approximately 45 HV. After shearing operation, the strain generated on the cut surface resulted in the increasing of hardness to be approximately 60 HV [12]. It can be seen that the strain generated on the half-shaving surface was similar in some extent in the parallel and reverse shearing directions and they were slightly larger in comparison to that generated on the sheared surface. The values were 60 HV and 62 HV in the cases of shearing and half-shaving operations, respectively.

The results illustrated that the half-shaved surface roughness value was smaller as well as the hardness was larger in comparison to those on the sheared surface. Further, the half-shaving direction rarely affected the cut surface roughness, in addition to the strain distribution and hardness value.

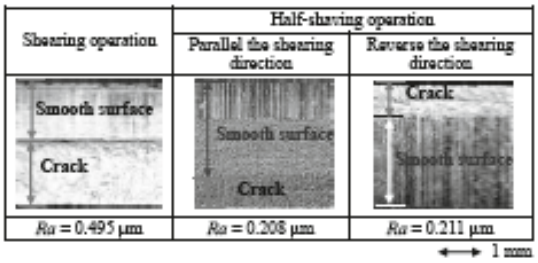


Figure 4. Comparison of the cut surface features (Cl_s = 1%t, Cl_{sh} = 0%t, D_{sh} = 0.3 mm).

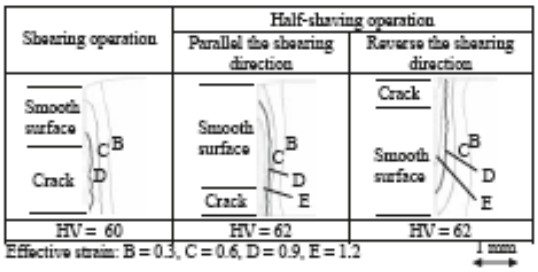


Figure 5. Comparison of the strain distribution analysis (Cl_s = 1%t, Cl_{sh} = 0%t, D_{sh} = 0.3 mm).

Stress Distribution on Shaving Operation. As shown in **Figure 6 (a)**, it was observed that the punch shaved the workpiece from the large chip to the small chip, in the case of shaving in the parallel shearing direction in which the shaved chip attempted to bend. Therefore, the tensile stress was easily generated on the shaved surface. On the other hand, in the case of shaving in the reverse shearing direction, the punch shaved the chip from the small to the large. This resulted in the shaved chip moving away easily. Thus, the bending feature was not yet generated. Therefore, the tensile stress generated on the shaved surface was small. As the shaving penetration increased, the bending feature was generated on both cases, as shown in **Figure 6(b)**. The formation of the large shaved chip on the half-shaving operation in the case of shaving in reverse shearing direction made it difficult for the shaved chip to move downwards and it thus attempted to bend. This resulted in the generation of a bending feature. As a result, the stress distribution generated on the shaved surface was similar to some extent in the parallel and reverse shearing directions. In addition, in case of large half-shaving penetration, the same shaved chip formations could be observed and they

were formed over the die in both cases. Therefore, the same level of stress distribution was obtained.

The result elucidated that the selection of half-shaving penetration affected the stress distribution in the shaving operation. The bending feature was easily generated on the shaving in the parallel shearing direction resulted in the crack formations were also easily formed.

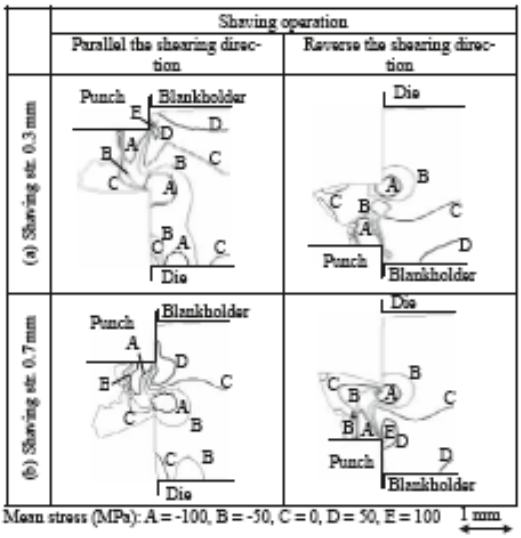


Figure 6. Stress distribution analysis with respect to the shaving direction (Cl_s = 1%t, Cl_{sh} = 0%t, D_{sh} = 0.3 mm, Half-shaving penetration = 1.5 mm).

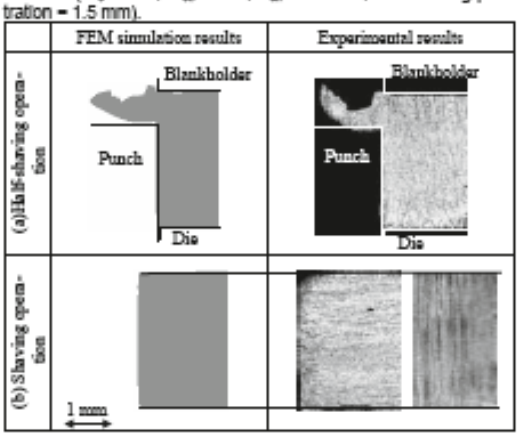


Figure 7. Comparison of FEM simulation and experimental results (Cl_s = 1%t, Cl_{sh} = 0%t, D_{sh} = 0.3 mm, Half-shaving penetration = 2.3 mm).

Validation of FEM Simulation Results. The FEM simulation results were validated by laboratory experiments on the half-shaving and shaving operations, as shown in **Figure 7**. Regarding the half-shaving operation, the FEM simulation results showed good conformity with the experimental results of the half-shaved chip. In addition, the FEM simulation results also showed good conformity with the experimental results on the shaved surface of successful and unsuccessful cases [11]. The error of the shaved surface feature analyzed by FEM was approximately 5% in comparison to the experimental results.

Conclusions

The shaving direction effects in the reciprocating shaving process were investigated using FEM. Further, the results were validated by laboratory experiments. On the half-shaving operation, the FEM simulation results showed the difference in the stress distribution, with respect to the half-shaving directions. The reverse shearing direction resulted in a bending feature and the tensile stress was easily generated on the shaved surface which resulted in easy crack formation. The quality of surface roughness and hardness were also examined. It was found that the half-shaving direction had no significant effects on the half-shaved surface roughness and hardness. However, the half-shaved surface roughness and hardness was better in comparison to that in the sheared surface. On the shaving operation, it was found that owing to the different shaved chip formation sizes, the bending feature and tensile stress on shaved surface were easily generated in the case of shaving in the parallel shearing direction in comparison to that in the reverse shearing direction which resulted in easy crack formations. In addition, the FEM simulation results showed a good agreement with the experimental results.

Acknowledgement

The authors would like to express our gratitude to the Thai Research Fund (TRF) (TRF-MRG5380117) for the financial assistance to this research. The authors also thank Assoc. Prof. Dr. Masahiko Jin, Nippon Institute of Technology (NIT), Japan, for his advice.

References

[1] E. Taupin, J. Breitling, W.T. Wu, T. Altan: Journal of Materials Processing Technology, 59 (1996), 68-78.
[2] R. Hambli: Journal of Mechanical Science and Technology, 44 (2002), 2089-2102.
[3] Z. Takinar, M. Nalbant and H. Gurun: Material & Design, 27 (2006), 1134-1138.
[4] S.F. Golovashchenko: Journal of Mechanical Science and Technology, 48 (2006), 1384-1400.
[5] C. Husson, J.P.M. Correia, L. Daridon, S. Ahzi: Journal of Materials Processing Technology, 199 (2008), 74-83.
[6] M. Murakawa, S. Thipprakmas, M. Jin: Transactions of NAMRI/SME, 31 (2001), 233-240.
[7] S. Thipprakmas: Key Engineering Materials, 443 (2010), 134-139.
[8] H. Hoffmann, F. Hormann: Key Engineering Materials, 344 (2007), 217-224.
[9] M. Murakawa, S. Thipprakmas, M. Jin: Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 44-513 (2003), 53-57, (in Japanese).
[10] S. Thipprakmas, S. Rojananan, P. Puramaputi: Journal of Materials Processing Technology, 197 (2008), 132-139.
[11] S. Thipprakmas, W. Phanitwong, M. Chiwitthee, T. Morkprom: Key Engineering Materials, 443 (2010), 201-206.
[12] K. Lange: Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, (1985), 24.15-24.30.