

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาลักษณะขอบตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ในการบีบอัดที่อุณหภูมิแบบอุ่น

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ* และ พงศกร หลีตระกูล

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแขก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

รับบทความ 9 กันยายน 2564 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิโลหะแผ่นและระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดเนื่องขึ้นงานสำเร็จจากกระบวนการบีบอัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 การทดสอบการตัดเฉือนดำเนินการโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่าที่มีระยะช่องว่างคมตัดแตกต่างกัน 3 ระดับ ก่อนการบีบอัดได้ทำการอบโลหะแผ่นในเตาอบไฟฟ้าให้มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ระดับ ทำการวิเคราะห์ผลลักษณะและคุณภาพขอบตัดขึ้นงานสำเร็จจากผลการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนพฤติกรรมด้านความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดจะทำการประเมินและวิเคราะห์จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ผลการทดลองพบว่าการตัดเฉือนโลหะแผ่นที่อุณหภูมิห้องส่งผลให้ขอบตัดเกิดส่วนของรอยแตกสูง โดยรอยแตกขนาดเล็กจะเริ่มก่อตัวขึ้นในช่วงแรกของการกดตัดและขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่อระยะการกดตัดของพินซ์เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะแผ่นเพิ่มสูงขึ้นและแม่พิมพ์มีระยะช่องว่างคมตัดน้อยลง ส่วนผลการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวรอยแตกและค่าความแข็งแรงระดับจุลภาค พบว่าเมื่ออุณหภูมิของโลหะแผ่นเพิ่มสูงขึ้นได้ส่งผลให้พื้นผิวรอยแตกมีลักษณะของการแตกแบบเหนียวเนื่องจากวัสดุมีค่าดัชนีความเครียดเชิงลดลง จากผลการวิจัยนี้สามารถนำข้อมูลผลการทดลองไปประยุกต์ใช้เพื่อการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการบีบอัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะช่องว่างคมตัดซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพขอบตัดขึ้นงานสำเร็จ

คำสำคัญ: กระบวนการบีบอัด; เหล็กกล้าชนิดเฟสคู่; คุณภาพขอบตัด; พื้นผิวรอยแตก; ดัชนีความเครียดเชิง

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Sheared Edges Characterization of High Strength Steel Sheet Metal DP590 in Warm Blanking Process

Natthasak Pornputsiri* and Pongsakorn Leetrakul

Faculty of Industry and Technology Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Phetchakaseam Road, Nhong-kea, Hua-Hin, prachuapkhirikhan 77110

Received 9 September 2021; Revised 29 April 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

This research aims to study the effect of metal sheets temperature and die-cutting clearance on the cutting edge quality of the finished product by the blanking operation of AHSS Dual Phase steel DP590 sheets. The shearing tests were carried out on an in blanking die by 3 size of punch–die clearance. Before the blanking test, the sheet metal is heated in an electric furnace at 4 temperature levels. To analyze finished product cutting edge quality were consider the examined results by the optical microscopy and scanning electron microscope. The strain hardening behavior on the cutting edge was evaluated and analyzed with the micro-hardness tested results by a Vickers hardness tester. The experiment results showed that the sheet metal shearing at room temperature resulted in a high fracture region on the cutting edge. The beginning of micro-cracks occurs in the early stages of press blanking and is larger as increased of the punch and die clearance. However, the height of the fracture region tends to decrease as the sheet metal temperature increases and the die clearance decreases. In the examination results of the fracture surface characteristics and micro-hardness values, it was found that when the sheet metal temperature increased, the fracture surface had the appearance of ductile fracture because the material had a low strain hardening index. The results of this research can be applied to determine the optimum conditions for sheet metal blanking of high-strength steel sheets. That is determined by the relationship between sheet metal temperature and die clearance, which directly affects the quality of the finished cutting edge.

Keywords: Blanking Process; Dual Phase Steel; Cutting Edge Quality; Strain Hardening Index

**Corresponding Author. Tel; +668 6667 6802, Email Address: natthasak.por@rmutr.ac.th*

1. บทนำ

การบีมตัดแผ่นเปล่า (Blanking Operations) เป็นกระบวนการตัดเฉือนโลหะแผ่นจากการกดตัดของ 펀ช์ (Punch) และตาย (Die) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น การเปลี่ยนรูปแบบถาวรและ การแตกหักของวัสดุ จากกระบวนการตัดเฉือนจะส่งผล ทำให้เกิดเป็นรอยตัดเฉือนที่ขอบตัดชิ้นงานและเกิด พฤติกรรมความเครียดแข็งในบริเวณดังกล่าว ทั้งนี้ใน กระบวนการบีมตัดแผ่นเปล่าโดยทั่วไปอาจส่งผลให้ ชิ้นงานสำเร็จไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ Konieczny และคณะ [1] ได้ประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบของ ลักษณะและคุณภาพขอบตัดจากการบีมตัดแผ่น เปล่าและจากการตัดด้วยเลเซอร์ ที่ส่งผลต่อ การความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความ แข็งแรงสูง ซึ่งพบว่า การตัดเฉือนด้วยเลเซอร์ให้ค่า ความสามารถในการขึ้นรูปต่ำกว่าการตัดเฉือนด้วยฟันช์ และตาย Golovashchenko และคณะ [2] ได้ทำการ ตรวจสอบผลกระทบของลักษณะขอบตัดที่ส่งผลต่อค่า ความสามารถในการขึ้นรูป ด้วยวิธีการทดสอบแบบดึงยึด พบว่าชิ้นทดสอบที่มีลักษณะขอบตัดซึ่งมีส่วนเรียบตรงสูง และมีส่วนการเกิดครีบน้อยจะมีความสามารถในการขึ้น รูปสูงกว่า นอกจากนี้ Mingqing Zhu และคณะ [3] ได้ รายงานถึงผลกระทบของข้อบกพร่องบนขอบตัดแผ่น เปล่า ที่นำไปสู่การแตกร้าวของขอบชิ้นงานเมื่อนำไปขึ้น รูปในกระบวนการขึ้นรูปถัดไป กล่าวคือส่วนเรียบตรง ของชิ้นทดสอบที่มีค่าความหนาผิวสูงจะมีแนวโน้มเกิด การแตกร้าวได้ง่ายกว่าเมื่อนำไปทำการขึ้นรูปใน กระบวนการต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพ ของชิ้นงานสำเร็จจึงควรต้องมีการปรับปรุงคุณภาพขอบ ตัดแผ่นเปล่าเพิ่มเติมก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ [4] กล่าวคือควรต้องมีการลบคมหรือตกแต่งเพื่อกำจัดครีบบน ขอบตัดก่อนการขึ้นรูป [5]

โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงถูกนำมาใช้ ในอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีในด้านความแข็งแรง ค่า ความเครียดแข็งและค่าความเค้นครากสูง โดยเฉพาะใน อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งจะช่วยให้ยาน ยนต์มีน้ำหนักเบา ส่งผลดีในด้านความปลอดภัยและเพิ่ม ประสิทธิภาพของการประหยัดน้ำมัน [6] อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการขึ้นรูปหรือกระบวนการตัดแผ่นเปล่า เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิปกติมักจะส่งผลให้ เกิดการแตกร้าวได้ง่าย ส่งผลให้มีสัดส่วนของรอย แตกร้าวบริเวณขอบตัดสูงซึ่งจะเป็นปัญหาและข้อจำกัด ต่อกระบวนการขึ้นรูปในกระบวนการถัดไป [7] พฤติกรรมเหล่านี้เกิดจากลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยเฉพาะเหล็กกล้าชนิด เฟสคู่ ซึ่งในโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสมาร์เทน ไซต์ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งและเปราะกระจายตัวอยู่ใน โครงสร้างพื้นของเฟอร์ไรท์ จึงทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีค่า ความแข็งแรงสูงแต่จะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่ายเมื่อ นำไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ [8] ทำให้เกิดข้อจำกัดด้าน ความสามารถในการขึ้นรูปเมื่อทำการขึ้นรูปหรือการ เปลี่ยนรูปถาวรที่อุณหภูมิห้องโดยเฉพาะการพับและการ ตัดเฉือนทางกล [9] อย่างไรก็ตาม ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 600°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก ใหม่ของเหล็กกล้าชนิดนี้ การขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมิ ดังกล่าวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของ ชิ้นงานสำเร็จหลังการขึ้นรูป [10] Nürnberg และคณะ [11] ได้ตรวจสอบผลกระทบของระยะช่องว่างคมตัดใน การตัดเฉือนโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและ สังเกตคุณภาพของขอบตัดที่ได้ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพ พื้นผิวของขอบตัด พบว่าการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มี ระยะช่องว่างคมตัดน้อยจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงกว่า ในทำนองเดียวกัน Scintilla และคณะ [12] ได้ทำการ ตรวจสอบคุณภาพของตัดโลหะแผ่น AZ31 ที่ได้จาก การตัดด้วยเลเซอร์และกระบวนการบีมตัดที่ทันสมัยเพื่อ ปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จ พบว่าการตัดด้วย กระบวนการบีมตัดได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพขอบตัดสูงกว่า

จากงานวิจัยที่ผ่านมายังได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของกระบวนการตัดแผ่นเปล่าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมด้านความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดเฉือน (Shear Affected Zone; SAZ) ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในกระบวนการตัด เช่น ความเร็วในการป้อนตัด ชนิดสารหล่อลื่น รูปแบบการหล่อลื่น และอุณหภูมิการตัดเฉือน [13] รวมไปถึงรายละเอียดในการออกแบบแม่พิมพ์ เช่น ระยะห่างช่องว่างคมตัด [14] มุมตัดเฉือน [15] และรัศมีคมตัดพินซ์และตาย [16] เป็นต้น ซึ่งค่าความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดสามารถตรวจสอบได้ด้วยการวัดค่าความแข็งแบบจุลภาคผ่านชั้นความหนาของโลหะแผ่นบริเวณขอบตัด [17], [18] หรือทำการวัดเชิงเปรียบเทียบจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและทิศทางการไหลตัวของเนื้อโลหะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง

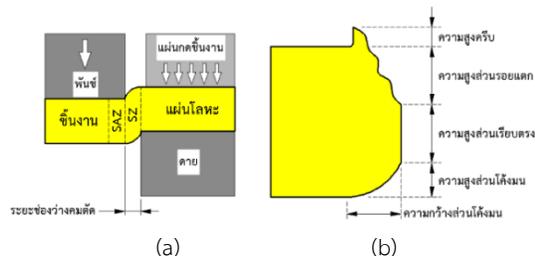
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดชิ้นงานและให้ข้อเสนอแนะที่เหมาะสมเกี่ยวกับข้อกำหนดในการออกแบบแม่พิมพ์และเงื่อนไขของกระบวนการตัดแผ่นเปล่าโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ในการลองได้ดำเนินการป้อนตัดโลหะแผ่นโดยใช้แม่พิมพ์ตัดและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับขอบตัดเฉือนขึ้นทดสอบ โดยได้จำแนกผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1 การประเมินผลการทดลองได้พิจารณาจากผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการป้อนตัดคือ ระยะห่างของช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิของขึ้นทดสอบขณะตัดเฉือน ที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัด รูปแบบการแตกหักและดัชนีค่าความเครียดเชิง

2. วิธีทดสอบและวิธีการทดลอง

2.1 การประเมินผลเกี่ยวกับคุณภาพขอบตัด

ลักษณะขอบตัดที่เกิดจากกระบวนการตัดเฉือนแต่ละส่วนมีความแตกต่างกันตามระยะความลึกในการกัดตัดซึ่งประกอบด้วย ส่วนโค้งมน (Rollover zone)

ส่วนเรียบตรง (Burnish Zone) ส่วนรอยแตก (Fracture Zone) และส่วนของครีบ (Burr) ดังรูปที่ 1 ส่วนลักษณะและความสูงของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัด จะทำการวัดขนาดจากภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical Macro-scope; OM) ของ JENCO รุ่น GL E20 และภาพถ่ายในแนวภาคตัดขวางของขึ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light Optical Microscope; LOM) ของ Olympus รุ่น CX31 ส่วนลักษณะและรูปแบบของรอยแตกบนขอบตัดชิ้นงาน จะทำการตรวจสอบจากภาพถ่ายด้านข้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ของ JEOL รุ่น JSM6010LV



รูปที่ 1 (a) องค์ประกอบของกระบวนการตัดแผ่นเปล่า (b) ภาคตัดขวางของขอบตัด

ค่าความแข็งระดับจุลภาค (Micro-hardness) ที่บริเวณขอบตัด ได้ถูกนำไปประกอบการประเมินค่าความเครียดเชิงและผลกระทบจากอุณหภูมิบริเวณขอบตัดเฉือนของขึ้นทดสอบซึ่ง Chiriac และคณะ [19] ได้เสนอการคำนวณค่าดัชนีความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดเฉือนดังสมการที่ (1)

$$ESH[\%] = \frac{H_v - H_{vbase}}{H_{vbase}} \quad (1)$$

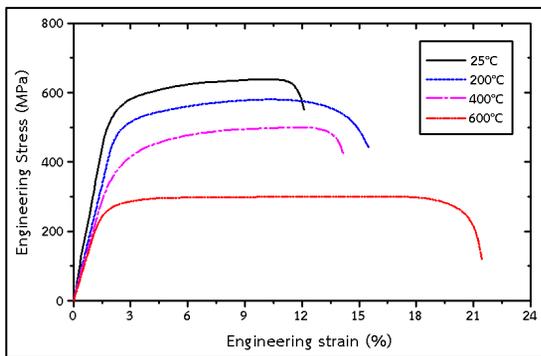
โดย ESH คือ ค่าดัชนีความเครียดเชิงของขอบตัดเฉือน H_v คือ ความแข็งระดับจุลภาคบนขอบตัดเฉือนและบริเวณใกล้กับขอบตัดซึ่งได้รับผลกระทบจากการตัดเฉือน ส่วน H_{vbase} คือความแข็งระดับจุลภาคของโลหะแผ่นก่อนการตัดเฉือน ซึ่งค่า H_v และ H_{vbase} ได้มาจากการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์

2.2 ข้อกำหนดการทดลอง

โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ขนาดความหนา 1 มม. ถูกตัดเตรียมในทิศทางขวางแนวการรีดเพื่อการบีบอัดโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่า (Blanking die) ซึ่งชิ้นงานสำเร็จมีรูปร่างเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนสมบัติทางกลของชิ้นงานได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN EN 10002-1 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์รุ่น Zwick /2020 ที่อุณหภูมิห้อง (25°C), 200°C, 400°C และ 600°C แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ เกรด DP590

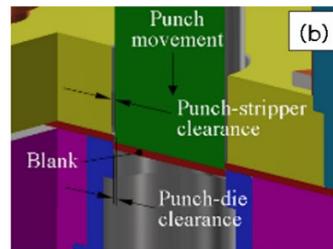
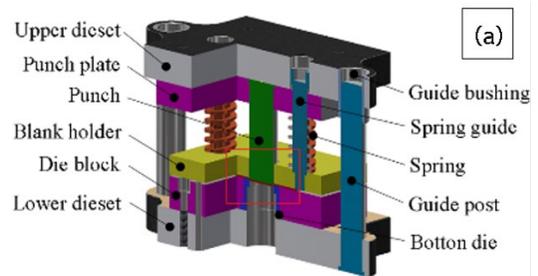
C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)
0.1766	1.3858	1.4262	0.0190	0.0306



รูปที่ 2 กราฟความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรมของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ในการทดสอบการตัดเฉือนโลหะแผ่นจะดำเนินการโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่า (Blanking die) ติดตั้งบนเครื่องบีบอัดโลหะชนิดเพลาค้อเหวี่ยง (Crank press) ขนาด 50 kN ส่วนรายละเอียดของส่วนประกอบแม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่าที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3(a), (b) โดยพินซ์และดายจะทำจากเหล็กกล้า

เครื่องมืองานเย็น SKD 11 และทำการชุบแข็งที่ความแข็ง 65 ± 2 HRC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบีบอัดและทนทานต่อการสึกหรอ ส่วนแผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder) จะถูกกดยึดด้วยสปริง สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ (Clearance) ที่ 3 ระดับคือร้อยละ 5, 8 และ 10 ของความหนาแผ่นโลหะตามลำดับ โดยออกแบบให้ดายเป็นขนาดคงที่และออกแบบพินซ์ให้มีขนาดความโตแตกต่างกันจำนวน 3 ขนาด เพื่อให้ได้ระยะช่องว่างคมตัดตามที่กำหนด



รูปที่ 3 (a) ภาพประกอบแม่พิมพ์ตัด (b) ภาพขยายของพินซ์-ดาย และระยะช่องว่างคมตัด

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดสอบการบีบอัดแผ่นเปล่าด้วยแม่พิมพ์ตัด ชุดดายเซ็ทด้านบนและด้านล่างจะถูกยึดติดกับแผ่นยึดแม่พิมพ์ของเครื่องบีบอัดโลหะ ดังนั้น เมื่อแรม (Ram) ของเครื่องบีบโลหะเคลื่อนที่ลงจะเกิดแรงกระทำที่แม่พิมพ์ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ แรงที่ส่งถ่ายไปยังพินซ์เพื่อการบีบอัดชิ้นงานและแรงที่ส่งถ่ายไปยังสปริงเพื่อกดและปลดแผ่นโลหะ ส่วนโลหะแผ่นชิ้นทดสอบจะถูกอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าซึ่งจะติดตั้งไว้ในพื้นที่เดียวกับเครื่องบีบโลหะโดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้

เที่ยงตรงและคงที่ตลอดการทดลองด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Proportional Integral Derivative Control; PID) ซึ่งชิ้นงานจะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ตรวจสอบขนาดความสูงส่วนต่าง ๆ ของขอบตัดเฉือนและรูปแบบการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM)

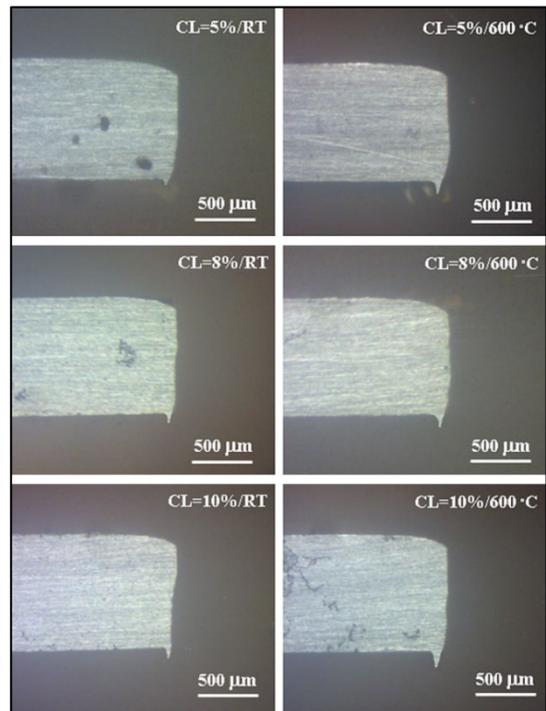
ชิ้นทดสอบที่ได้จากการบ่มตัดจะแบ่งรูปแบบการตรวจสอบลักษณะและขนาดของขอบตัดเฉือนเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะนำชิ้นทดสอบไปถ่ายภาพด้านข้างของขอบตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) และตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวรอยแตกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ส่วนที่ 2 จะนำชิ้นทดสอบไปหล่อด้วยเรซินเพื่อวิเคราะห์ลักษณะขอบตัดในแนวภาคตัดขวาง โดยการขัดผิวเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320-1,200 และทำการวิเคราะห์ลักษณะขอบตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM) ส่วนการวิเคราะห์ค่าความเครียดเชิงปริมาตรขอบตัด ได้นำชิ้นงานไปวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ในแนวขนานกับขอบตัดเฉือน (SZ) และในแนวตั้งฉากกับรอยตัดเฉือน (SAZ) ที่ระยะทางห่างกันทุกๆ 0.2 มม. ด้วยแรงกดขนาด 100 gf. และกดค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และนำค่าความแข็งที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดแข็ง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. ลักษณะและรูปร่างของขอบตัด

ลักษณะขอบตัดเฉือนชิ้นทดสอบที่ได้จากการบ่มตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่มีอุณหภูมิและระยะช่องว่างคมตัดแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM) แสดงให้เห็นถึงส่วนต่างๆ บนขอบตัดเฉือนซึ่งประกอบไปด้วย

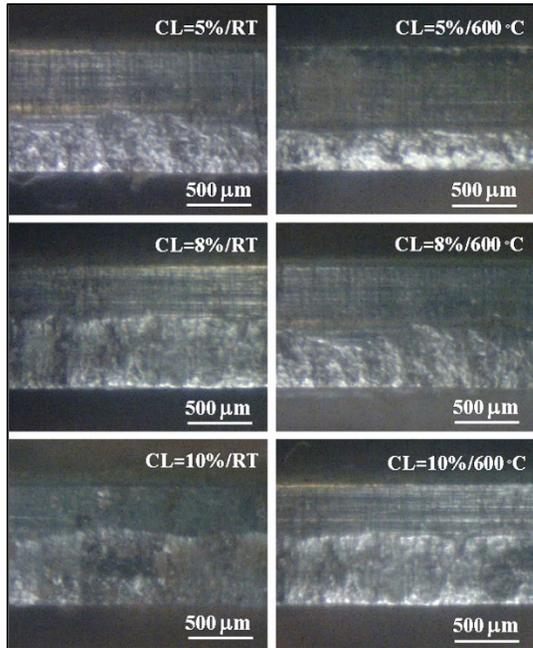
1. ความกว้างและความสูงของส่วนโค้งมนและความสูงครีบ สามารถตรวจสอบและวัดขนาดได้ชัดเจนจากมุมมองภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4 เพื่อการวัดค่าความกว้างและความสูงของส่วนโค้งมนและความสูงครีบของชิ้นทดสอบที่ได้จากการบ่มตัดโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิการตัดเฉือนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4 ลักษณะภาคตัดขวางชิ้นทดสอบจากการตัดเฉือนด้วยระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

2. ค่าความสูงของส่วนเรียบตรงและส่วนรอยแตก สามารถตรวจสอบได้ชัดเจนจากภาพด้านข้างของขอบตัดดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงภาพด้านข้างของขอบตัดที่ได้จากการบ่มตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิการตัดเฉือนที่แตกต่างกัน โดยค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะได้รับการวัดค่าความสูงโดยรวมของส่วนโค้งมนและส่วนเรียบตรงจากภาพด้านข้างและนำมาลบด้วยค่าความสูงของส่วนโค้งมนที่ได้จากการวัดจาก

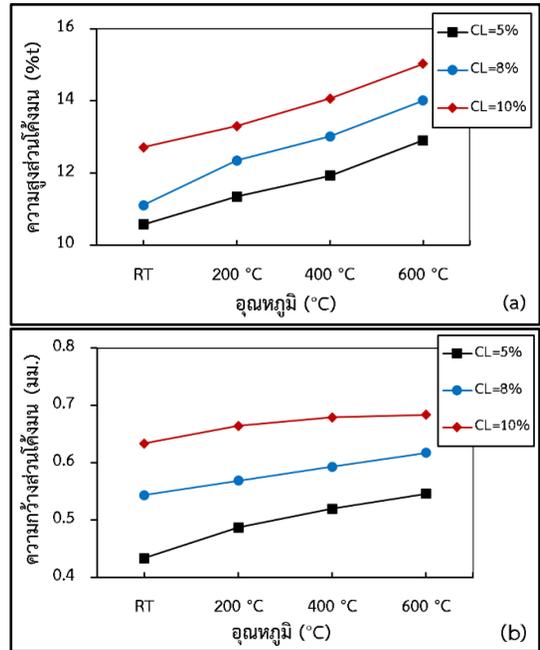
ภาพภาคตัดขวาง ส่วนค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะใช้วิธีการนำเอาค่าความหนาของชิ้นทดสอบ (1 มม.) มาลบด้วยค่าความสูงของส่วนโค้งมนและส่วนเรียบตรง



รูปที่ 5 ภาพด้านข้างขอบตัดชิ้นทดสอบเพื่อการวัดค่าความสูงส่วนเรียบตรงและส่วนรอยแตก

3. รายละเอียดและรูปแบบของพื้นผิวรอยแตกสามารถตรวจสอบได้จากมุมมองภาพด้านข้างของชิ้นทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบถึงรูปแบบการแตกหักบนขอบตัดชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากรายละเอียดผลการทดลองพบว่า ค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิชิ้นทดสอบและระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้นดังผลการทดลองรูปที่ 6(a) เช่น ชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ความสูงส่วนโค้งมนจะอยู่ที่ 10.58% ของความหนาโลหะแผ่นและความสูงส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 12.91% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C และยัง



รูปที่ 6 (a) ความสัมพันธ์ของความสูงส่วนโค้งมนกับอุณหภูมิและช่องว่างคมตัด (b) ความสัมพันธ์ของความกว้างส่วนโค้งมนกับอุณหภูมิและช่องว่างคมตัด

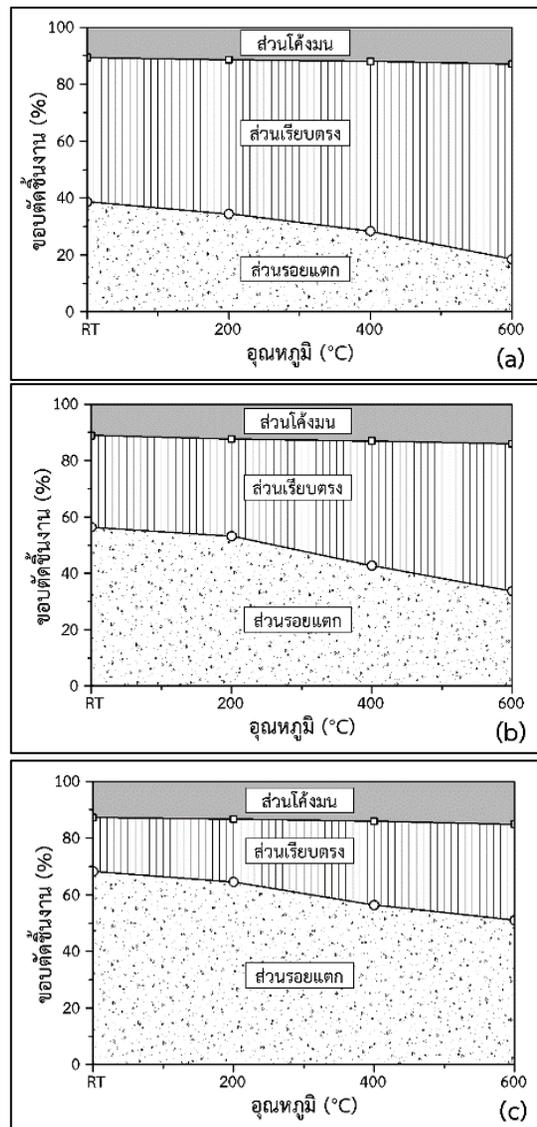
พบว่าความสูงของส่วนโค้งมนจะเพิ่มมากขึ้นหากทำการป้อนตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น ดังเช่นการป้อนตัดที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ได้ขนาดความสูงโค้งมน 12.91% เมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มขึ้นเป็น 10%t จะพบว่าค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 15.03% เป็นต้น ในส่วนความกว้างส่วนโค้งมนจะขึ้นอยู่กับระยะการตัดตัวของโลหะแผ่น ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างช่องว่างคมตัดของฟันซ์และตาย ซึ่งจะตรวจสอบโดยการวัดระยะในทิศทางแนวนอนระหว่างจุดเริ่มต้นของส่วนโค้งจนถึงจุดเริ่มต้นของส่วนเรียบตรง โดยรายละเอียดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6(b) ซึ่งพบว่าค่าความกว้างของส่วนโค้งมนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิชิ้นทดสอบและระยะห่างช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น เช่น ชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) จะมีค่าความกว้างของ

ส่วนโค้งมน 0.544 มม. และจะเพิ่มเป็น 0.618 มม. เมื่อทำการบีบอัดที่อุณหภูมิ 600 °C ดังนั้น จึงเห็นได้ชัดว่าค่าความสูงและความกว้างของส่วนโค้งมนจะแปรผันตามระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระยะช่องว่างคมตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของค่าความเค้นมากกว่าทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการกดตัดมากขึ้นเพื่อเอาชนะความแข็งแรงของวัสดุรวมทั้งอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้วัสดุมีค่าความเหนียวหรือมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้การตัดเฉือนเกิดขึ้นช้าลง

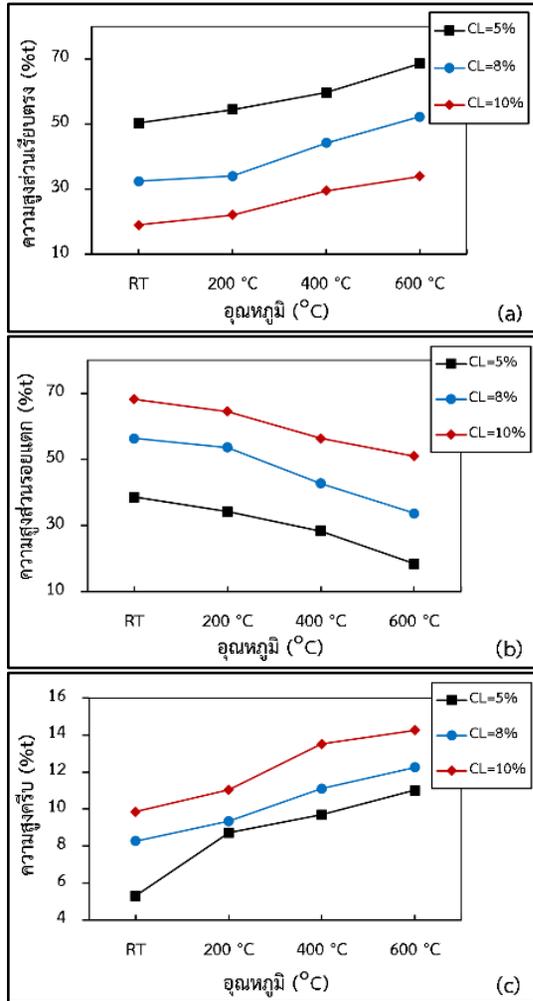
ส่วนเรียบตรงบนขอบตัดเกิดขึ้นจากแรงอัดระหว่างพันธกับแผ่นขึ้นงาน ซึ่งพบว่าค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้นและเมื่อระยะช่องว่างคมตัดแคบลง ส่วนกลไกการเกิดรอยแตกกว้างที่ขอบตัดเมื่อพิจารณา ลักษณะขอบตัดที่ได้จากการบีบอัดที่อุณหภูมิห้อง จะพบว่ารอยแตกกว้างจะเริ่มก่อตัวเป็นรอยแตกขนาดเล็ก ต่อเนื่องจากการเกิดส่วนเรียบตรงซึ่งมีทิศทางขนานไปกับระนาบการเฉือนของโลหะแผ่น เมื่อระยะการกดตัดเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้รอยแตกดังกล่าวขยายตัวผ่านชั้นความหนาของวัสดุเกิดเป็นรอยฉีกขาดขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของส่วนต่างๆ บนขอบตัดเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงโดยรวมของขอบตัด ซึ่งได้จากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t 8%t และ 10%t แสดงไว้ในรูปที่ 7(a), (b) และ (c) ตามลำดับ

ผลการวัดค่าความสูงของส่วนเรียบตรงบนขอบตัด ที่ได้จากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิการตัดเฉือนที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 8(a) พบว่าค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เช่นขึ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีค่าความสูงของส่วนเรียบตรง 19.05% ของความหนาโลหะแผ่น และความ

สูงของส่วนเรียบตรงจะเพิ่มขึ้นเป็น 33.95% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C แต่ทั้งนี้ยังพบว่าอัตราความสูงของส่วนเรียบตรงจะลดลงเมื่อแม่พิมพ์มีระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น เช่นการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ได้ค่าความสูงส่วนเรียบตรง 68.62% และเมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มขึ้นเป็น 10%t จะส่งผลให้ความสูงของส่วนเรียบตรงจะลดลงเหลือ 33.95% เป็นต้น



รูปที่ 7 อัตราความสูงส่วนต่าง ๆ บนขอบตัด (a) Cl=5%t (b) Cl=8%t และ (c) Cl=10%t



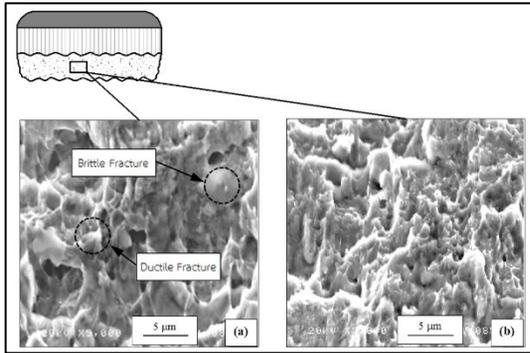
รูปที่ 8 อัตราส่วนความสูงส่วนต่าง ๆ บนขอบตัด (%t)
(a) ส่วนเรียบตรง (b) ส่วนรอยแตก และ (c) ส่วนครีบบ

ส่วนการเกิดรอยแตกบนขอบตัดซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระจากการฉีกขาดของวัสดุที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากการเกิดส่วนเรียบตรง ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าความสูงของส่วนรอยแตกจากภาพตัดขวางในทิศทางขนานกับแนวขอบตัด จากจุดสุดท้ายของส่วนเรียบตรงไปจนถึงระนาบผิวด้านกลางของโลหะแผ่น โดยผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 8(b) ซึ่งพบว่าความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น เช่นการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ได้ค่าความ

สูงส่วนรอยแตก 56.4% ของความหนาโลหะแผ่นและความสูงของส่วนรอยแตกจะลดลงเหลือ 33.72% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองยังพบว่าค่าความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างของช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น ดังตัวอย่างผลการทดสอบของแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ที่อุณหภูมิ 200 °C พบว่าส่วนรอยแตกจะอยู่ที่ 34.2% และความสูงของส่วนรอยแตกจะเพิ่มขึ้นเป็น 53.62% และ 64.55% เมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มขึ้นที่ 8%t และ 10%t ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนและระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลทำให้ชิ้นทดสอบมีค่าความสูงครีบบเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งผลการตรวจสอบค่าความสูงของครีบบที่ขอบตัดชิ้นทดสอบแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 8(c) ในการตรวจสอบค่าความสูงของครีบบได้ดำเนินการด้วยวิธีการวัดค่าความสูงโดยรวมจากภาพด้านข้างของชิ้นทดสอบ โดยกำหนดจุดเริ่มต้นที่ระนาบผิวด้านบนของโลหะแผ่นจนถึงปลายสุดของครีบบและลบด้วยค่าความหนาของแผ่นชิ้นทดสอบ (1 มม.) ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่าค่าความสูงครีบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนและระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น ดังผลการตรวจสอบค่าความสูงครีบบของชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ความสูงครีบบจะอยู่ที่ 9.86% ของความหนาโลหะแผ่น โดยความสูงครีบบจะเพิ่มเป็น 14.27% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ในทำนองเดียวกันจากตัวอย่างผลการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 400 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t จะมีความสูงครีบบ 9.69% และความสูงครีบบเพิ่มขึ้นเป็น 13.52% เมื่อทำการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t

จากผลการทดลองพบว่าคุณภาพของขอบตัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิการตัดเฉือน เนื่องจากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้องจะเกิดการขยายตัวของรอย



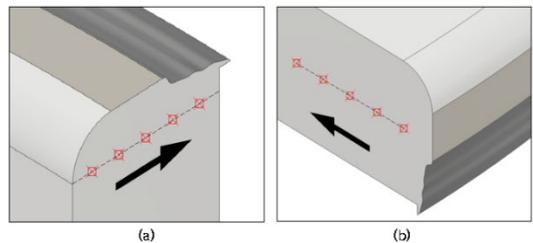
รูปที่ 9 ลักษณะพื้นผิวรอยแตก (a) การตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (b) การตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C

แตกที่ไม่เสถียร โดยจะมีรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นในบริเวณของส่วนเรียบตรงบนขอบตัด ซึ่งจะทำให้เนื้อวัสดุซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กหลุดออกจากพื้นผิวส่วนเรียบตรง ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจนจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นอกจากนี้ยังพบว่าระดับของอุณหภูมิการตัดเฉือนยังส่งผลต่อลักษณะของพื้นผิวรอยแตกดังรายละเอียดในรูปที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวรอยแตกด้วยภาพถ่ายที่กำลังขยายสูง เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงลึกในการวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับกลไกการแตกหักของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ จากรูปที่ 9(a) แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบซึ่งได้จากการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t จะเห็นได้ว่าการบีบอัดที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) พื้นผิวรอยแตกหักจะมีลักษณะเป็นหลุมตื้นๆ ขนาดเล็กและมีความสูงน้อย ซึ่งเป็นรูปแบบของการแตกหักแบบเปราะ ส่วนรูปที่ 9(b) แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวรอยแตกบนขอบตัดชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C ซึ่งจะพบว่าพื้นผิวรอยแตกมีลักษณะเป็นหลุมลึกและมียอดผิวสูง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าวัสดุจะมีรูปแบบการแตกหักแบบเหนียวมากขึ้น

3.2. การกระจายตัวของค่าความเครียดแข็ง

ชิ้นทดสอบที่ได้จากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและที่อุณหภูมิแตกต่างกันถูกนำไป

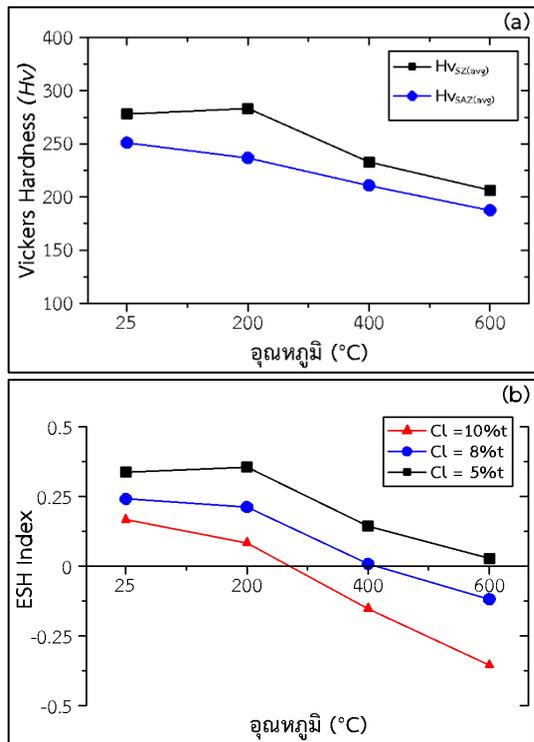
จับยึดเพื่อกำหนดตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งแรงวิกเกอร์โดยเครื่องวัดความแข็งแรงแบบจุลภาค (Micro-hardness tester) ใน 5 ตำแหน่งซึ่งมีระยะห่างจากขอบตัดที่ต่างกันและคำนวณเป็นค่าความแข็งแรงเฉลี่ย ซึ่งรูปแบบการกำหนดตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งแรงในแนวนานกับขอบตัดเฉือน (SZ) จะทำการกำหนดจุดทดสอบดังรูปที่ 10(a) ส่วนการตรวจสอบค่าความแข็งแรงในแนวตั้งฉากกับขอบตัดเฉือน (SAZ) จะทำการกำหนดจุดทดสอบดังรูปที่ 10(b) โดยโลหะแผ่นก่อนการตัดเฉือนที่อุณหภูมิปกติมีค่าความแข็งแรงที่ 200 Hv. จากนั้นนำผลการวัดค่าความแข็งแรงไปคำนวณหาค่าดัชนีของความเครียดแข็ง (ESH) จากสมการ (1)



รูปที่ 10 การกำหนดตำแหน่งและทิศทางทดสอบความแข็งแรง (a) แนวนานกับขอบตัดเฉือน (b) แนวตั้งฉากกับขอบตัดเฉือน

ผลการวัดค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบจากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ดังรูปที่ 11 (a) พบว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นในทั้งสองทิศทาง โดยชิ้นทดสอบที่ได้จากการบีบอัดที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยในแนวนานกับขอบตัดเฉือน (SZ) คือ 278 HV และจะลดลงเหลือ 203 HV เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงในแนวตั้งฉากกับขอบตัดเฉือน (SAZ) พบว่าที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่ 250 HV และจะลดเหลือ 187 HV เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 600 °C โดยค่าความแข็งแรงของโลหะแผ่นก่อนการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) จะถูกใช้เป็นค่าความแข็งแรงอ้างอิง (HV_{base}) เพื่อการ

คำนวณค่าดัชนีความเครียดแข็ง (ESH) ทั้งนี้ผลการคำนวณค่าดัชนีความเครียดแข็งของชิ้นทดสอบภายหลังการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 11(b)



รูปที่ 11 (a) ความแข็งเฉลี่ยในแนวขนานและตั้งฉากกับขอบตัดเฉือนที่ระยะช่องว่างคมตัด 5%t (b) ค่าดัชนีความเครียดแข็งในแนวขนานกับขอบตัดเฉือนที่ระยะช่องว่างคมตัดต่าง ๆ

โดยดัชนีของความเครียดแข็งที่แสดงค่าเป็นบวกบ่งชี้ว่าหลังการตัดเฉือนได้มีความเครียดแข็งเกิดขึ้นบริเวณขอบตัด โดยค่าดัชนีความเครียดแข็งจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้หากค่าดัชนีความเครียดแข็งหลังการขึ้นรูปมีค่าเป็นลบจะบ่งชี้ว่าวัสดุดังกล่าวไม่มีผลกระทบด้านความเครียดหรือหลังการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีค่าความแข็งต่ำกว่าค่าความแข็งอ้างอิง โดยพบในชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8%t และ

ชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 400 °C และ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t เนื่องจากค่าความร้อนของชิ้นทดสอบในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสามารถเอาชนะพฤติกรรมความเค้นจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุ จึงส่งผลให้ค่าดัชนีของความเครียดแข็งมีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการตัดเฉือนได้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อค่าดัชนีของความเครียดแข็งของชิ้นทดสอบหลังการบีบอัดขึ้นรูป

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะช่องว่างคมตัดที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดขึ้นงานสำเร็จโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิการการตัดเฉือนจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพขอบตัดขึ้นงานสำเร็จ คือ เมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความสูงของส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรง และส่วนของครีบบ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มลดลง
2. อุณหภูมิการการตัดเฉือนจะส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวรอยแตก โดยพบว่า การตัดเฉือนที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้พื้นผิวรอยแตกมีลักษณะการแตกแบบเปราะ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นลักษณะของพื้นผิวรอยแตกจะมีลักษณะของการแตกแบบเหนียวมากขึ้น
3. อุณหภูมิการตัดเฉือนส่งผลต่อค่าดัชนีความเครียดแข็งบริเวณขอบตัด ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าดัชนีความเครียดแข็งมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าบริเวณขอบตัดเฉือนจะไม่ได้รับผลกระทบจากค่าความเครียดแข็งเมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิสูง
4. ระยะช่องว่างคมตัดส่งผลต่อลักษณะขอบตัดและความเครียดแข็งบริเวณขอบตัด ซึ่งพบว่าเมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ส่วนโค้งมน ส่วนรอยแตก และส่วนของครีบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่

ความสูงของส่วนเรียบตรง และดัชนีความเครียดแข็งมีแนวโน้มลดลง

ดังนั้นสภาวะการบีบอัดแผ่นเปล่าที่อุณหภูมิสูง ไม่เพียงแต่ช่วยในการปรับปรุงคุณภาพขอบตัดเท่านั้น แต่ยังช่วยในการลดแรงตัดและเพิ่มความสามารถการขึ้นรูปในขั้นตอนถัดไปได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย งานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Konieczny and T. Henderson, "On Formability Limitations in Stamping Involving Sheared Edge Stretching," *SAE Tech*, 2007.
- [2] S. F. Golovashchenko, "Quality of Trimming and its Effect on Stretch Flanging of Automotive Panels," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 17, pp. 316-325, 2008.
- [3] Z. Mingqing, C. L. Yixian, L. Xiaochuan and C. Zhaoheng, "Numerical forming limit prediction for the optimisation of initial blank shape in hot stamping of AA7075," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 4, pp. 269-280, 2021.
- [4] F. Sergey, N. Wang and L. Quochung, "Trimming and sheared edge stretchability of automotive 6xxx aluminum alloys," *Journal of Materials Processing Tech*, vol. 264, pp. 64-75, 2019.
- [5] S. Golovashchenko, W. Zhou, S. Nasherlahkami and N. Wang, "Trimming and Sheared Edge Stretchability of Light Weight Sheet Metal Blanks," *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 1552-1557, 2017.
- [6] M. Bolin, Z. G. Liu, Z. Jiang, X. Wu, K. Diao and M. Wa, "Prediction of forming limit in DP590 steel sheet forming: An extended fracture criterion," *Materials and Design*, vol. 96, pp. 401-408, 2016.
- [7] J. H. Kim, J. H. Sung, K. Piao and R. H. Wagoner, "The shear fracture of dual-phase steel," *International Journal of Plasticity*, vol. 27, no. 1, pp. 1658-1676, 2011.
- [8] L. Pan, J. Xiong, Z. Zuo, W. Tan, J. Wang and W. Yu, "Study of the stretch-flangeability improvement of dual phase steel," *Procedia Manufacturing*, vol. 50, pp. 761-764, 2020.
- [9] B. L. Ennis, C. Bos, M. P. Aarnts, P. D. Lee and E. Jimenez-Melero, "Work hardening behaviour in banded dual phase steel structures with improved formability," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 713, pp. 278-286, 2018.
- [10] D. Parkes, D. Westerbaan, S.S. Nayak, Y. Zhou, F. Goodwin, S. Bhole and D.L. Chen, "Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-

- phase steels at warm and low temperatures,” *Materials and Design*, vol. 56, pp. 193–199, 2014.
- [11] G. Nürnberg, X. Jing, D. Scherer, K. Ersoy-Nürnberg, R. Golle, J. Bohlen, L. Fuskova, D. Letzig and H. Hoffmann, “Improving the sheared edge in the blanking of commercial AZ31 sheet through texture modification,” *Journal of Material Processing Technology*, vol. 211, pp. 2022–2031, 2011.
- [12] L. D. Scintilla and L. Tricarico, “Experimental investigation on fiber and CO₂ inert gas fusion cutting of AZ31 magnesium alloy sheets,” *Optics & Laser Technology*, vol. 46, pp. 42–52, 2013.
- [13] Z. Tekiner, M. Nalbant and H. Gürün, “An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal,” *Materials and Design*, vol. 27, pp. 1134–1138, 2006.
- [14] A. Mackensen, M. Golle, R. Golle and H. Hoffmann, “Experimental investigation of the cutting force reduction during the blanking operation of AHSS sheet materials,” *CIRP Annals*, vol. 59, pp. 283–286, 2010.
- [15] K. Mori, S. Saito and S. Maki, “Warm and hot punching of ultra high strength steel sheet,” *CIRP Annals*, vol. 57, pp. 321–324, 2008.
- [16] P. Fazily, J. Yu and C. W. Lee, “Finite Element Analysis of Blanking Operation of Magnesium Alloy (AZ31) Sheet Using Ductile Fracture Criteria and Its Experimental Verification at Various Temperatures,” *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1063, 2018.
- [17] J. Dykeman, S. Malcolm, B. Yan, J. Chintamani, G. Huang, N. Ramiseti and H. Zhu, “Characterization of Edge Fracture in Various Types of Advanced High Strength Steel,” *SAE Technology*, 2011.
- [18] C. Butcher, D. Anderson, M. Worswick, “Predicting Failure during Sheared Edge Stretching Using a Damage-Based Model for the Shear-Affected Zone,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 6, pp. 304–312, 2013.
- [19] C. Chiriac, M. F. Shi, “Studies on Edge Strain Hardening Produced by Trimming Operations”, *SAE Technology*, 2013.