

อิทธิพลของกระบวนการเจาะรูที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายรูในเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูงเกรด SP153-590

ปกรณ์ ชุมรัมย์^{1*} Nobuhiro Koga² และ วารุณี เปรมานนท์¹

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปลูกขยายรู (Hole flanging) เป็นกระบวนการหนึ่งที่เกิดปัญหาการร้าวแตกจากขอบรูเจาะ งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเจาะรูซึ่งประกอบไปด้วยการใช้เลเซอร์ Wire-EDM Water-jet และการใช้พันธที่มีต่อค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขยายรู ซึ่งแต่ละกระบวนการที่ใช้ในการเจาะรูส่งผลให้เกิดความหยาบผิวของรูเจาะ ค่าความแข็งและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่แตกต่างกัน ความสามารถในการขึ้นรูปลูกขยายรู (Hole flangeability) ได้จากการทดสอบหาอัตราส่วนของการขยายรู (Hole expansion ratio) จากการทดสอบ Hole expansion test โลหะที่ใช้ ในการทดสอบเป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SP153-590 หนา 1.2 มิลลิเมตร พบว่ากระบวนการเจาะรูด้วยเลเซอร์และการเจาะรูด้วยพันธทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณขอบรูเจาะทำให้ค่าความแข็งเฉพาะบริเวณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการขึ้นรูปลูกขยายรูลดลง ส่วนกระบวนการเจาะรูด้วย Wire-EDM และ Water-jet ซึ่งไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ ขอบรูเจาะที่ผิวเรียบ (R_u ต่ำ) ส่งผลให้ความสามารถในการขึ้นรูปลูกขยายรูสูง

คำสำคัญ : เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (HSS), ขอบตัด, อัตราส่วนการขยายรู, กระบวนการเจาะรู, การขยายรู

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

² Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology, Saitama, Japan

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: pakorn.chu@kmutt.ac.th รับเมื่อ 18 มีนาคม 2559 ตอบรับเมื่อ 19 สิงหาคม 2559

Influence of hole making processes on the hole expansion ratio of high strength steel grade SP153-590

Pakorn Chumrum^{1*}, Nobuhiro Koga² and Varunee Premanond¹

Abstract

Hole flanging is one of a process that tearing is easily occurred on the hole edge. The purpose of this research work is to study the influences of hole making processes including; laser, wire-EDM, water-jet and piercing by punch and die on the limiting hole expansion ratio. The mention processes produced the hole with different characteristics i.e. surface roughness, hardness and microstructure. The hole flangeability was evaluated by limiting hole expansion ratio from hole expansion test. This sheet material used for the experiments was high strength steel grade SP153-590 of 1.2 mm thickness. This results showed that the hole cut by laser and pierced by piercing punch which cause changing in microstructure thus increasing hardness introduced low ability of hole flanging. In this case, the process of hole making by wire-EDM and water-jet which cause no effect to raw material, lower the surface roughness (R_a) as the higher is the limiting for hole expansion ratio.

Keywords: High strength steel (HSS), Cutting edge, Hole expansion ratio, Piercing process, Hole flanging

¹ Department of Tool and Materials Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

² Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology, Saitama, Japan.

* Corresponding author, E-mail: pakorn.chu@kmutt.ac.th Received 18 March 2015, Accepted 19 August 2016

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีความตื่นตัวในการนำแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (HSS) และแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (AHSS) เข้ามาใช้ในสายการผลิตโครงสร้างของยานยนต์ รวมถึงชิ้นส่วนต่างๆ ของยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย ปัญหาวัสดุในกลุ่มนี้คือนอกจากวัสดุจะมีความแข็งแรงสูงยังมีค่าความสามารถในการยึดตัวต่ำซึ่งส่งผลให้งานขึ้นรูปทำได้ยาก โดยงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นในเรื่องของการป้องกันปัญหาในเรื่องของการยึดตัวกลับของเหล็กแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงภายหลังจากการขึ้นรูป [1-3] ในกระบวนการผลิตโครงสร้างและชิ้นส่วนยานยนต์การขึ้นรูปขยายรู (Hole flanging) เป็นกระบวนการหนึ่งที่น่ามาใช้สำหรับการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของยานยนต์ ซึ่งมักจะเกิดปัญหาการแตกหรือร้าวบริเวณขอบรูในระหว่างการขึ้นรูปขยายรูหรือการขึ้นรูปขยายรูไม่ได้ตามที่ออกแบบไว้ ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการขึ้นรูปขยายรูซึ่งได้แก่คุณภาพของขอบตัด โดยมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ระยะเคลียร์แรนซ์ (Clearance) ในกระบวนการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่เหมาะสมสามารถเพิ่มคุณภาพขอบตัดส่งผลให้การขึ้นรูปขยายรูในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเพิ่มขึ้น [4-7] แต่การใช้ระยะเคลียร์แรนซ์น้อยแม้ว่าจะได้พื้นผิวขอบตัดที่เรียบขึ้นจริงแต่การสึกหรอของพันธจะสูงขึ้นตามมา [8] ซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม จึงเลือกใช้ระยะเคลียร์แรนซ์ในช่วง 15 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชิ้นงานมาใช้ในงานทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาในเรื่องของความสามารถในการขึ้นรูปขยายรูสำหรับแผ่นเหล็กกล้า

ความแข็งแรงสูง (HSS) เกรด JIS: SP153-590 ด้วยการทดสอบแบบ Hole expansion test จากขอบตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเจาะรูที่แตกต่างกันทั้งจากกระบวนการตัดเจาะรูชิ้นงานที่มีความร้อนและไม่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องในระหว่างการตัดเจาะรูชิ้นงานซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของวัสดุและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุชิ้นงาน เพื่อมุ่งเน้นสร้างฐานข้อมูลการใช้งานให้กับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการตัดสินใจเลือกใช้กระบวนการตัดเจาะรูชิ้นงานก่อนนำไปผ่านการขึ้นรูปขยายรูสำหรับแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

2. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับวัสดุแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JIS : SP153-590 ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร โดยทำการเตรียมแผ่นชิ้นงานมาทำการตัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด กว้าง 90 และยาว 90 มิลลิเมตร พร้อมเจาะรูที่กึ่งกลางแผ่นชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการตัดเจาะรูชิ้นงานที่แตกต่างกัน 4 ชนิด อันได้แก่ 1.การใช้พันธที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ทำการเจาะรูภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ส่งผลต่อการเกิดส่วนตัดเฉือนที่ 2 ชิ้นที่บริเวณขอบตัดโดยอ้างอิงระยะเคลียร์แรนซ์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชิ้นงาน [4] 2.การใช้เลเซอร์ 3.การใช้ Water-jet และ 4.การใช้ Wire-EDM โดยกระบวนการเจาะรูด้วยการใช้เลเซอร์ Water-jet และ Wire-EDM กระทำตามเงื่อนไขของทางบริษัทที่รับดำเนินการ ในด้านของสมบัติทางกลของวัสดุแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JIS : SP153-590 พิจารณาได้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JIS : SP153-590

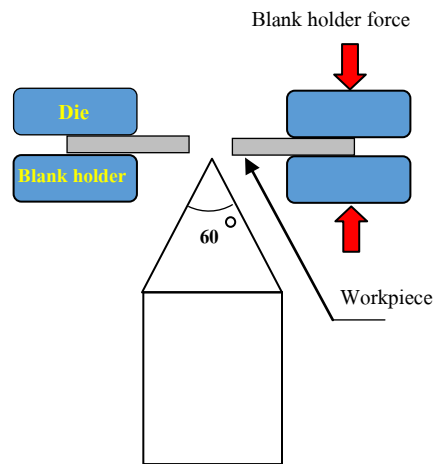
Grade	Tensile Strength [MPa]	Yield Strength [MPa]	% Elongation
SP153-590	614.3	453.8	26.34

หลังจากทำการเจาะรูกึ่งกลางแผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแล้วบริเวณขอบตัดของรูเจาะที่ผ่านกระบวนการตัดที่แตกต่างกัน 4 ชนิด จะถูกดำเนินการตรวจสอบค่าความเรียบผิว ค่าความแข็งและถ่ายภาพพื้นผิวบริเวณขอบตัดของรูเจาะจากกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ที่มีโปรแกรมฟังก์ชันวิเคราะห์จากชิ้นงาน และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังทำการขึ้นรูปด้วยวิธี Hole expansion test จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope) จากนั้นจะนำแผ่นเหล็กที่ผ่านการเจาะรูกึ่งกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม จากกระบวนการที่แตกต่างกัน 4 ชนิด มาทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธี Hole expansion test ตามมาตรฐาน ISO/TS16630 [9] ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยการชี้วัดความสามารถในการขึ้นรูปนั้นพิจารณาจากค่า % Hole expansion ratio (% HER) ซึ่งหาได้จากสมการ

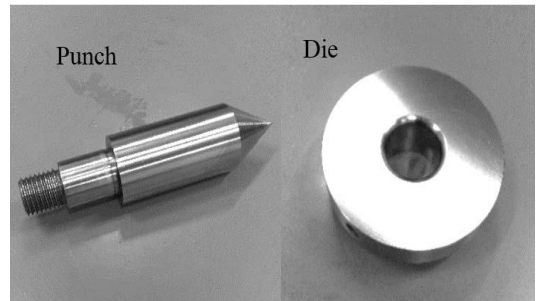
$$\% HER = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100 \quad (1)$$

d_1 : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังเกิดการแตกจากการทดสอบ Hole expansion test [mm]

d_0 : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะเริ่มต้น [mm]



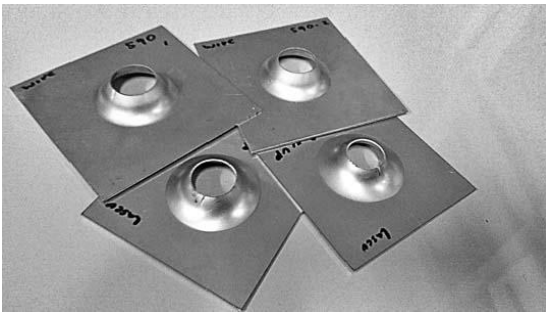
รูปที่ 1 แผนภาพการทดสอบ Hole expansion test



รูปที่ 2 พันซ์และดายที่ใช้ในการทดลอง

พันซ์และดายที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธี Hole expansion test ทำจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นเกรด JIS : SKD11 ผ่านการชุบแข็งให้มีความแข็ง 60 ± 1 HRC โดยพันซ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม

บริเวณส่วนหัวพunchจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยทำมุม 60 องศา ส่วนคายมี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร บริเวณปากคายมีรัศมี 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยพunchและคายถูกใช้งานร่วมกับเครื่อง Universal Sheet Metal Testing Machine กำหนดเงื่อนไขให้แรงที่ใช้ในการจับยึดแผ่นชิ้นงาน 60 kN ในขณะที่ทำการขึ้นรูปพunchเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 28±1 มิลลิเมตร/นาที และไม่ใช้สารหล่อลื่นในขณะที่ทำการทดสอบ ภายหลังจากการทดสอบด้วยวิธี Hole expansion test จะได้ชิ้นงานในลักษณะที่แสดงดังในรูปที่ 3



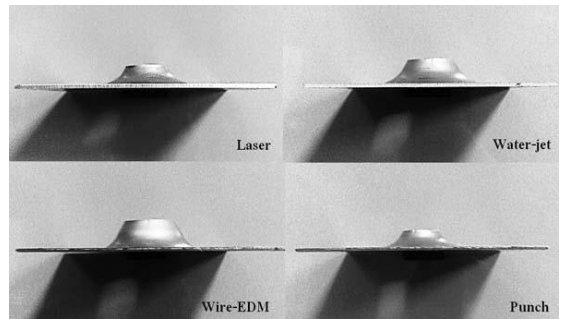
รูปที่ 3 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทดสอบ Hole expansion test

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

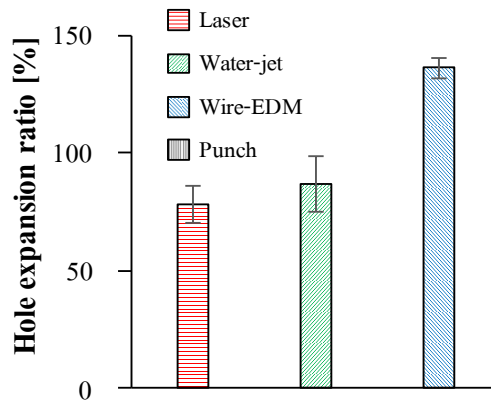
3.1 การทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธี Hole expansion test

ความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านกระบวนการตัดเจาะรูที่แตกต่างกัน สามารถประเมินผลได้จากการทดสอบด้วยวิธี Hole expansion test ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยใช้ค่า % HER เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการขึ้นรูปซึ่งหาได้จากสมการที่ (1) โดยจากกราฟในรูปที่ 5 แสดงค่า % HER

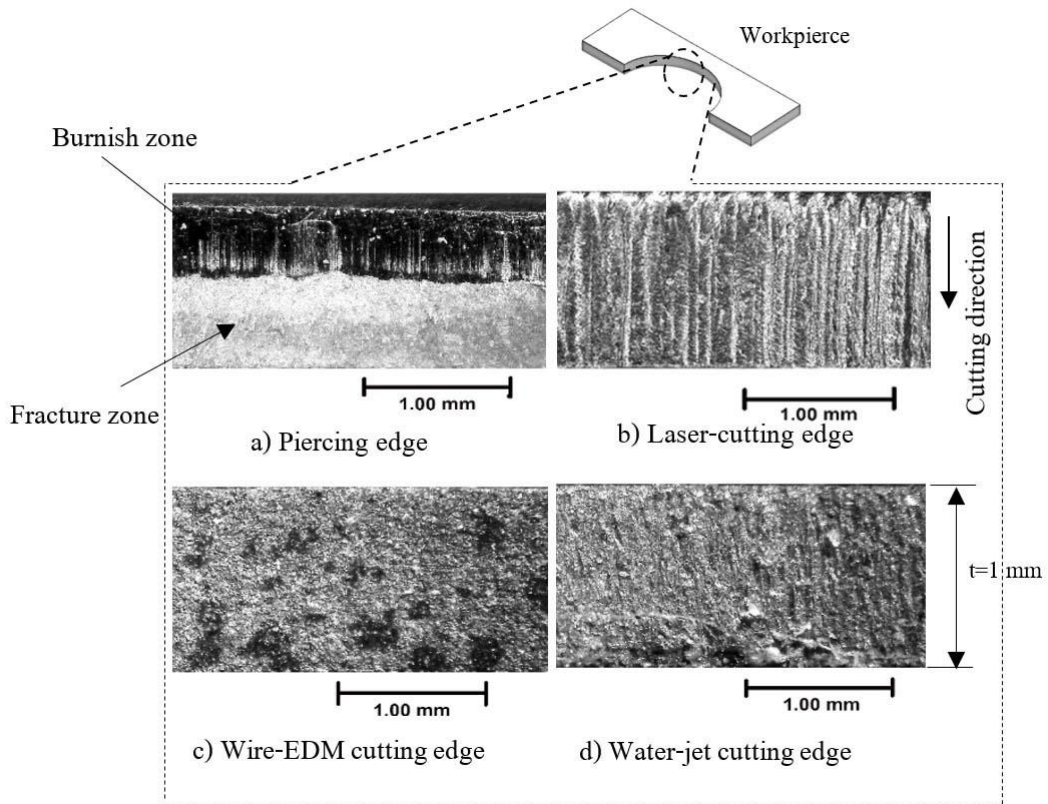
จากลักษณะพื้นผิวของรูเจาะที่ได้จากกระบวนการที่แตกต่างกัน พบว่าการตัดเจาะรูแผ่นชิ้นงานด้วยกระบวนการ Wire-EDM มีความสามารถในการขึ้นรูปสูงที่สุดโดยมีค่า %HER สูงถึง 136.67% รองลงมาได้แก่ชิ้นงานที่ผ่านการตัดเจาะรูด้วยกระบวนการ Water-jet การตัดด้วยเลเซอร์และการใช้พunchในการเจาะรูตามลำดับ โดยแนวโน้มค่า % HER ที่ผ่านการตัดเจาะรูด้วยกระบวนการตัดเลเซอร์และการเจาะรูด้วยพunchมีแนวโน้มที่แตกต่างกันไม่มากนัก



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่ผ่านการทำ Hole expansion test



รูปที่ 5 ค่า % HER ที่ได้จากกระบวนการตัด



รูปที่ 6 ลักษณะพื้นผิวขอบตัดในแต่ละกระบวนการตัดเจาะรู

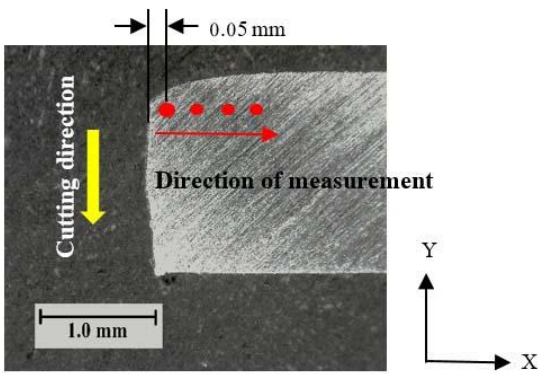
3.2 ลักษณะของพื้นผิวบริเวณขอบตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเจาะรู

เมื่อพิจารณาพื้นผิวบริเวณขอบรูเจาะที่ผ่านกระบวนการตัดหรือเจาะรูชิ้นงานที่แตกต่างกัน 4 ชนิด มาทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) สามารถสังเกตความแตกต่างของสภาพพื้นผิวบริเวณขอบรูเจาะได้ดังแสดงในรูปที่ 6 กรณีการใช้พันธ์ในการเจาะรู พบว่าขอบรูเจาะที่ได้มีพื้นที่ของส่วนตัดเฉือนที่น้อยกว่าส่วนแตกหักได้ดังแสดงในรูปที่ 6a) เมื่อพิจารณาพื้นผิวขอบรูเจาะที่ได้จากกระบวนการตัดด้วย เลเซอร์จากรูปที่ 6b) สังเกตได้ว่าพื้นผิวบริเวณขอบ

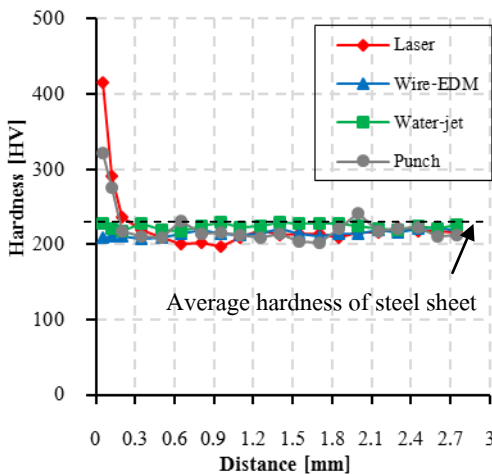
รูเจาะจะมีการเกิดเนื้อของพื้นผิวในลักษณะเป็นริ้วคลื่นตลอดทั้งช่วงความหนาของแผ่นชิ้นงาน ในกรณีพื้นผิวขอบรูเจาะที่ได้จากกระบวนการตัดด้วย Wire-EDM จะมีลักษณะพื้นผิวโดยรวมใกล้เคียงกันทั่วทุกบริเวณซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 6c) ในขณะที่การตัดด้วย Water-jet พื้นผิวบริเวณขอบรูเจาะมีลักษณะของเนื้อวัสดุเกิดการไหลตัวจากด้านบนลงสู่ด้านล่างเนื่องจากแรงดันน้ำที่สูงและสารกัดกร่อนดันในขณะที่ทำการตัดเพื่อให้เนื้อของวัสดุเกิดการฉีกขาดออกจากกันซึ่งปรากฏอย่างชัดเจนในด้านต่างของขอบรูดังแสดงในรูปที่ 6d)

3.3 อิทธิพลของค่าความแข็งบริเวณพื้นผิวขอบตัดที่ส่งผลความสามารถในการขึ้นรูปขยายรู

จากการนำชิ้นงานมาตรวจสอบค่าความแข็งของพื้นผิวบริเวณขอบรูดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งในทิศทางตาม แนวแกน X โดยทำการตรวจวัดจากขอบตัดของชิ้นงานเข้ามาแสดงดังในรูปที่ 8

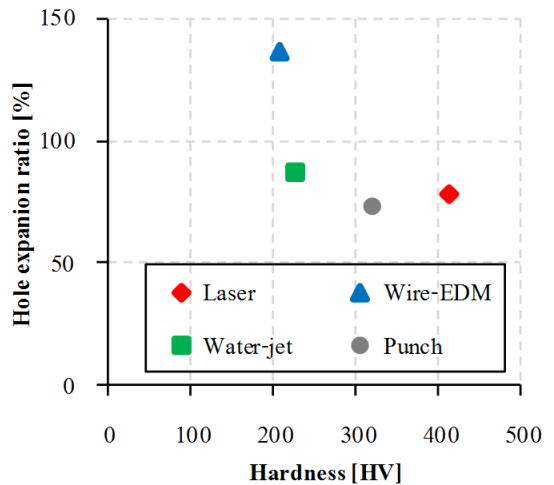


รูปที่ 7 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งตามแนวแกน X



รูปที่ 8 การวัดค่าความแข็งบริเวณพื้นผิวของขอบตัด

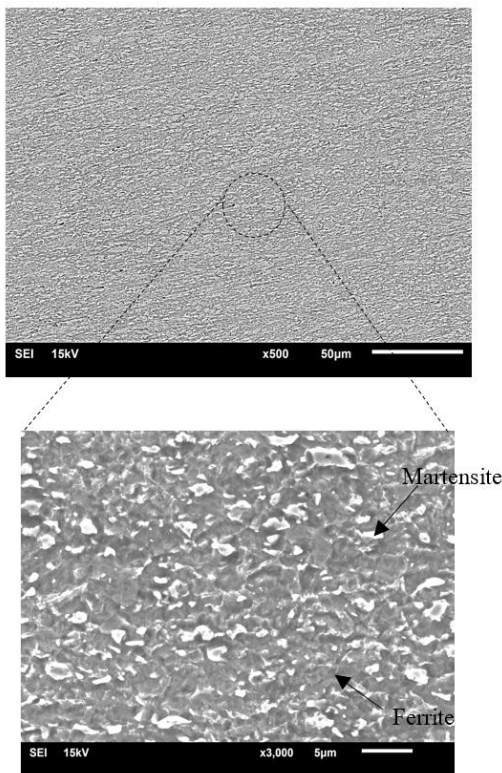
จากขอบตัดเข้ามา 0.05 มิลลิเมตร พบว่าเนื้อของวัสดุในบริเวณขอบรูที่ได้จากการตัดเจาะรูด้วยเลเซอร์มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่สูงมากถึง 414.8 HV ส่วนการเจาะรูด้วยพันธึ้นเนื้อของวัสดุในบริเวณขอบรูทั้งบริเวณส่วนตัดเฉียงและส่วนแตกหักแนวโน้มของค่าความแข็งเฉลี่ย 322.1 HV ในขณะที่การตัดด้วย Water-jet และ Wire-EDM มีแนวโน้มค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 200 HV จนถึงช่วงระยะห่างจากขอบรูเข้ามา 0.2 มิลลิเมตร เป็นต้นไป สังเกตได้ว่าค่าความแข็งของวัสดุที่ได้จากการตัดแต่ละกระบวนการตัดมีแนวโน้มที่ตลอดการตรวจวัดโดยค่าความแข็งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งของแผ่นชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการตัดใดๆมา ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความแข็งอยู่ที่ประมาณ 215.5 HV



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของความแข็งขอบตัดและ %HER

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งที่พื้นผิวขอบตัดและค่า % HER โดยแสดงดังในรูปที่ 9 พบว่าแนวโน้มของค่า % HER จะสูงถ้าค่าความแข็ง

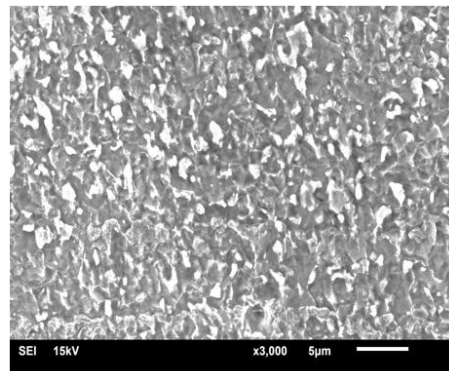
บริเวณใกล้ขอบตัดมีค่าที่ต่ำซึ่งสังเกตได้ในกรณีของการตัดด้วย Wire-EDM และ Water-jet ตามลำดับ ในขณะที่แนวโน้มของค่า % HER จะต่ำถ้าค่าความแข็งบริเวณใกล้ขอบตัดมีค่าสูงซึ่งอยู่ในกลุ่มของการตัดด้วยการใช้เลเซอร์และการใช้พันธ์ โดยค่าความแข็งที่เกิดขึ้นในบริเวณขอบตัดเป็นผลเนื่องจากกระบวนการที่นำมาใช้ในการตัดเจาะรูซึ่งงานส่งผลให้พฤติกรรมของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SP153-590 ที่ถ่ายจาก SEM

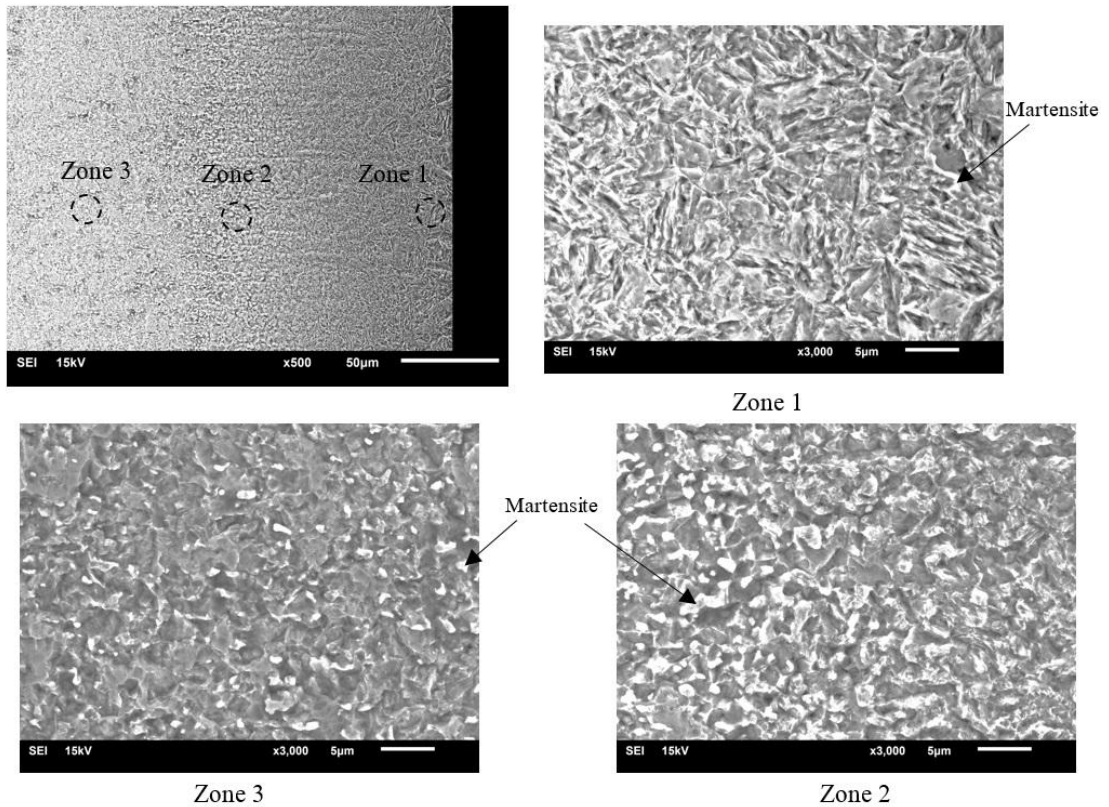
โดยกระบวนการตัดเจาะรูที่นำมาใช้ศึกษานั้นสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ การตัดเจาะรูที่ไม่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องอันได้แก่ การตัดเจาะรูด้วย Water-jet และการใช้พันธ์กับการตัดเจาะรูที่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องในระหว่างการตัดเจาะรูซึ่งได้แก่ การตัดเจาะรูด้วย Wire-EDM และการตัดด้วยเลเซอร์

เมื่อพิจารณาในเรื่องของโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SP153-590 ที่นำมาใช้ในการทดลองซึ่งเป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงประเภท dual phase ที่ประกอบด้วยโครงสร้างมาเทนไซต์ที่แสดงเป็นส่วนสีขาวลอยอยู่บนพื้นที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณใกล้ขอบรูที่ผ่านการตัดด้วย Wire-EDM ที่ถ่ายจาก SEM

ในกรณีของชิ้นงานที่ตัดเจาะรูด้วย Wire-EDM แม้ว่าจะเป็นกระบวนการตัดที่มีความร้อนจากการกัดเซาะเนื้อโลหะด้วยการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงระหว่างการตัดเจาะรูซึ่งงานก็ตาม แต่ในขณะที่ทำการตัดชิ้นงานจะจมอยู่ในน้ำตลอดเวลา ความร้อนในขณะที่ทำการตัดจึงถูกถ่ายเทลงสู่น้ำอย่างรวดเร็ว



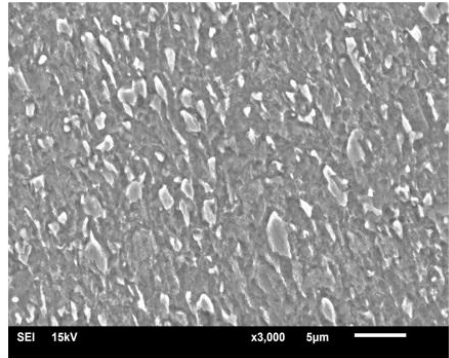
รูปที่ 12 ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ผ่านการตัดด้วยเลเซอร์ในบริเวณโซนต่างๆที่ถ่ายจาก SEM

ทำให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบตัดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 11 ค่าความแข็งของพื้นผิวในบริเวณขอบตัดจึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งเฉลี่ยของแผ่นชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการตัดใดๆ ในขณะที่การตัดเจาะรูด้วยเลเซอร์นั้นชิ้นงานจะได้รับความร้อนโดยตรงจากพลังงานของโปรตรอนซึ่งต้องมีมากพอที่จะสามารถทำลายพันธะทางเคมีที่อะตอมของวัสดุยึดกันอยู่ความร้อนจากพลังงานในส่วนนี้จะเกิดเป็นความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone ; HAZ) [10] เมื่อพิจารณาภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณขอบตัด

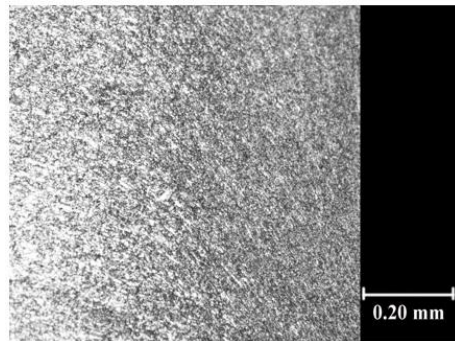
ของชิ้นงานที่ตัดเจาะรูด้วยเลเซอร์ พบว่าการตัดด้วยเลเซอร์ส่งผลให้พฤติกรรมของโครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุออกได้เป็น 3 โซนด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 12 โดยในโซนที่ 1 ซึ่งเป็นโซนที่อยู่ใกล้บริเวณขอบตัดมากที่สุดสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของวัสดุได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อพิจารณาบริเวณโซนที่ 1 พบว่าการใช้เลเซอร์ในการตัดเนื้อวัสดุในบริเวณนี้จะได้รับความร้อนอย่างรุนแรงในขณะที่ลำแสงเลเซอร์วิ่งตัดผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดรวมถึงการเย็นตัวที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

ในบริเวณดังกล่าวส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็ง [11] ซึ่งหมายถึงการที่โครงสร้างมาแทนไซต์ในบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเรื่องสัดส่วนของโครงสร้างมาแทนไซต์ (สีขาว) ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (สีดำ) ทำให้มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุในด้านของความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งที่วัดได้จากกราฟที่แสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยค่าความแข็งที่สูงมากในบริเวณนี้มีผลต่อการเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกในขณะที่ทำการขึ้นรูปทำให้ค่า % HER ที่ได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดด้วย Wire-EDM

เมื่อพิจารณาบริเวณ โซนที่ 2 ซึ่งเป็นโซนที่อยู่ถัดออกมาเป็นลำดับที่ 2 จากขอบตัดจะสังเกตได้ว่าผลจากความร้อนในระหว่างการตัดด้วยเลเซอร์ยังส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ แต่เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการตัดด้วยเลเซอร์มีการถ่ายเทเข้ามาในบริเวณนี้ลดลง ดังนั้นสัดส่วนของโครงสร้างมาแทนไซต์ (สีขาว) ในบริเวณนี้จึงมีปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับในบริเวณโซนที่ 1 ส่งผลให้ค่าความแข็งในบริเวณนี้ลดลงเหลือประมาณ 290 HV ในขณะที่บริเวณโซนที่ 3 เป็นช่วงระยะที่ห่างจากขอบตัดเข้ามาประมาณ 0.15 มิลลิเมตร พบว่าโครงสร้างจุลภาคในบริเวณนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเกิดผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากความร้อนจากการตัดไม่สามารถแพร่เข้าไปถึงในบริเวณนี้ ดังนั้นค่าความแข็งของวัสดุในบริเวณนี้จึงแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าความแข็งของแผ่นชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการตัดใดๆมาที่แสดงไว้ในกราฟของรูปที่ 8



รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรูที่ผ่านการตัดด้วย Water-jet ที่ถ่ายจาก SEM

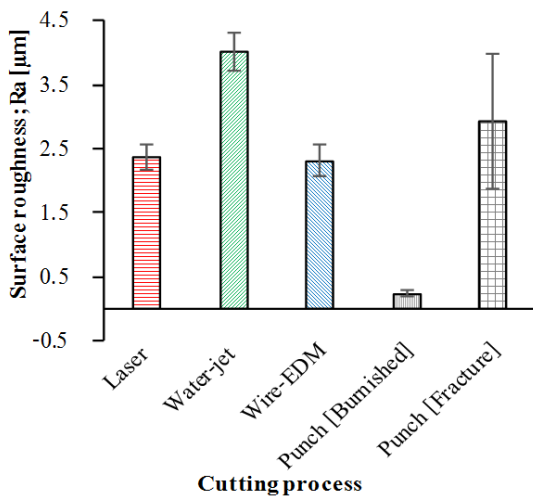


รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรูที่ผ่านการตัดเจาะรูด้วยพันธที่ถ่ายจาก Optical Microscope

ในกรณีการตัดเจาะรูที่ไม่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งได้จากการตัดเจาะรูด้วย Water-jet และการใช้พันธ พบว่าการตัดด้วย Water-jet ไม่ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 13 ดังนั้นค่าความแข็งของวัสดุในบริเวณนี้จึงมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการตัดใดๆมา ในขณะที่การตัดเจาะรูด้วยพันธนั้นในระหว่าง

การตัดพื้นที่บริเวณรอบขอบตัดจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรดังแสดงในรูปที่ 14 ส่งผลให้ความต้านแรงในการเปลี่ยนรูปเพิ่มสูงขึ้นซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งของวัสดุในบริเวณนี้เพิ่มมากขึ้นรวมถึงผลกระทบจากพื้นผิวในบริเวณส่วนแตกหักของขอบตัดที่มีผลต่อการส่งเสริมค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของส่วนแตกหักซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อค่า %HER [8] ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดเจาะรูด้วย Water-jet

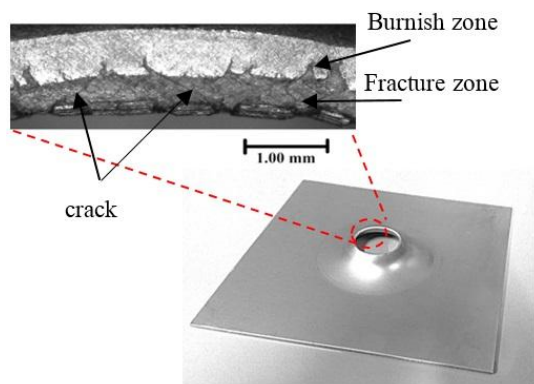
3.4 อิทธิพลของค่าความหยาบผิวบริเวณพื้นผิวของรูเจาะที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปขยายรู



รูปที่ 15 ค่าความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (R_a) บริเวณขอบตัดของแต่ละกระบวนการตัดเจาะรู

จากการตรวจสอบพื้นผิวบริเวณขอบรูเจาะด้วยการวัดค่าความหยาบของพื้นผิวเฉลี่ย (R_a) โดยแสดงในรูปที่ 15 การใช้พัลส์ทำการเจาะรูชิ้นงานพื้นผิวบริเวณ

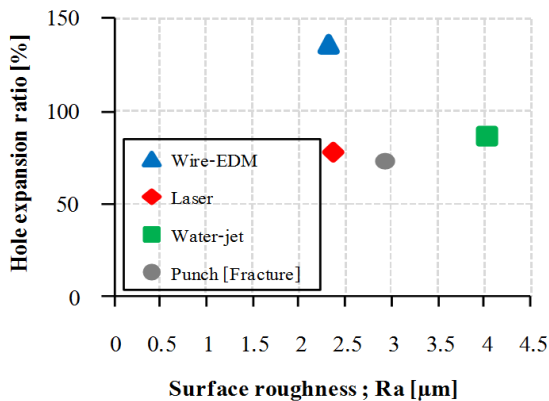
รูเจาะสามารถแบ่งค่าความหยาบของพื้นผิวออกได้เป็น 2 ส่วน ซึ่งในบริเวณส่วนตัดเฉือนของขอบตัด (Burnish zone) จะมีค่าความหยาบผิวน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณส่วนแตกหัก (Fracture zone) โดยช่วงรอยต่อระหว่างส่วนตัดเฉือนกับส่วนแตกหักมีความไวต่อการก่อให้เกิดการเกิดรอยแตกในขณะทำการขึ้นรูป [7] ดังแสดงในรูปที่ 16 จากเหตุผลดังกล่าวค่าความหยาบผิวบริเวณส่วนแตกหักจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์อิทธิพลของค่าความหยาบผิวที่มีต่อ % HER



รูปที่ 16 การเกิดรอยแตกหรือฉีกขาดบริเวณส่วนแตกหักของรูเจาะที่ผ่านกระบวนการเจาะรูด้วยพัลส์

ในกรณีค่าความหยาบผิวของพื้นผิวที่ได้จากการตัดเจาะรูชิ้นงานด้วยเลเซอร์และ Wire-EDM มีแนวโน้มของค่าความหยาบพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าน้อยกว่าค่าความหยาบผิวบริเวณส่วนแตกหักของรูเจาะที่ได้จากการเจาะรูด้วยพัลส์ ส่วนในกรณีการตัดเจาะรูด้วย Water-jet ให้ค่าความหยาบของพื้นผิวบริเวณขอบรูเจาะมากที่สุด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) บริเวณรูเจาะกับค่า % HER ดังแสดงในรูปที่ 17 พบว่าไม่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) บริเวณรูเจาะกับค่า % HER ที่ชัดเจน โดยการตัดเจาะรูชิ้นงานด้วย Wire-EDM และเลเซอร์ให้ค่าความหยาบของพื้นผิวบริเวณรูเจาะที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าความหยาบผิวที่ต่ำ แต่การตัดเจาะรูชิ้นงานด้วย Wire-EDM ให้ค่า % HER ที่สูงกว่าตัดเจาะรูชิ้นงานด้วยเลเซอร์ ส่วนการตัดเจาะรูชิ้นงานด้วย Water-jet ซึ่งให้ค่าความหยาบผิวบริเวณรูเจาะมากที่สุดแต่กลับให้ค่า % HER สูงกว่าการเจาะรูชิ้นงานด้วยพันธ์และการตัดด้วยเลเซอร์



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) บริเวณขอบตัดและค่า %HER

เมื่อพิจารณาความหยาบผิวในกรณีที่ไม่มีอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเข้ามาเกี่ยวข้องคือ กรณีการเจาะรูด้วย Wire-EDM และ Water-jet พบว่ารูเจาะที่มีผิวเรียบ (R_a ต่ำ) ให้ค่า % HER ที่สูงกว่ากรณีที่รูเจาะมีผิวหยาบ

4. สรุปผล

กระบวนการเจาะรูด้วยเลเซอร์และการเจาะรูด้วยพันธ์มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุในบริเวณขอบรูเจาะที่ส่งผลให้ค่าความแข็งในบริเวณขอบรูเจาะเพิ่มมากขึ้นมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อค่า % HER โดยค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า % HER มีแนวโน้มที่ลดลง ส่วนในกรณีของกระบวนการเจาะรูด้วย Wire-EDM และ Water-jet ซึ่งไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุในบริเวณขอบรูเจาะดังนั้นการเจาะรูที่ทำให้ผิวบริเวณตรงขอบรูเจาะมีความเรียบ (R_a ต่ำ) ส่งผลให้ค่า % HER มีแนวโน้มที่สูงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณการได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) (สัญญาเลขที่ PHD/0078/2552) รวมถึงบริษัทไทยซัมมิท ออโต้พาร์ท อินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและความร่วมมือในระหว่างการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chen and K. Muammer, “Simulation of spring back variation in forming of advanced high strength steels”, Journal of Materials Processing Technology 190(1–3), 2007, pp. 189–198.
- [2] F. Ozturk, S. Toros and S. Kilic, “Tensile and spring-back behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures” Journal of Iron and Steel Research International 16(6), 2009, pp. 41–46.

- [3] S.W Lee and D.Y Yang, “An assessment of numerical parameters influencing spring back in explicit finite element analysis of sheet metal forming process”, *Journal of Materials Processing Technology* 80–81, 1998, pp. 60–67.
- [4] K. Mori, Y. Abe and Y. Suzui, “Improvement of stretch flangeability of ultra high strength steel sheet by smoothing of sheared edge”, *Journal of Materials Processing Technology* 210, 2010, pp. 653-659.
- [5] T. Sirinakorn, V. Uthaisangasuk and S. Srimanosawapak, “Effect of the tempering on mechanical properties of dual phase steels”, *Journal of Metal, Materials and Minerals* 24(1), 2014, pp. 13–20. (in Thai)
- [6] D.J. Thomas, “Effect of Mechanical Cut-Edges on the Fatigue and Formability Performance of Advanced High- Strength Steels”, *Journal of Failure Analysis and Prevention* 12, 2012, pp. 518-531.
- [7] D.J. Thomas, “Understanding the Effects of Mechanical and Laser Cut-Edges to Prevent Formability Ruptures During Automotive Manufacturing”, *Journal of Failure Analysis and Prevention* 13, 2013, pp. 451-462.
- [8] P. Chumrum, N. Koga and V. Premanond, “Experimental investigation of energy and punch wear in piercing of advanced high-strength steel sheet”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79, 2015, pp. 1035-1042.
- [9] ISO/TS16630, “Metallic materials-Method of hole expanding test” Technical Specification, 2003, pp. 1-6.
- [10] V. Tangwarodomnukun, “Laser micromachining processes to reduce the size of the HAZ” [Online], Available: [http://viboon.org/2010/10/31/Laser micromachining processes to reduce the size of the HAZ](http://viboon.org/2010/10/31/Laser%20micromachining%20processes%20to%20reduce%20the%20size%20of%20the%20HAZ), 2010 (in Thai)
- [11] S.O. Al-Mashikhi, J. Powell, A. Kaplan and K.T. Voisey, “Heat affected zones and oxidation marks in fiber laser–oxygen cutting of mild steel”, *Journal of Laser Applications* 23(4), 2011, pp. 042003-1-042003-7.