พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขอบตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษในกระบวนการเจาะรูด้วยแม่พิมพ์

The Metamorphosis Behavior of Sheared Edge on Ultra High Strength Steel in Piercing Process

วิชัย พุ่มจันทร์ * และ คมกริช ละวรรณวงษ์

Wichai Pumchan * and Komgrit Lawanwong

Received: 20 December 2020, Revised: 18 August 2021, Accepted: 27 September 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขอบตัดของรูเจาะบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษที่ระยะเคลียแรนซ์ 4 ระดับได้แก่ 3%, 10%, 20% และ 40% โดยใช้พันช์เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ลงบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษเกรดต่างๆ โดยใช้ความหนา 1.2 มม. วัสดุทำแม่พิมพ์เจาะรูคือเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด JIS; SKD11 ชุบแข็งที่ระดับความแข็งสูงสุด 62±2 HRC วิเคราะห์อิทธิพลของระยะเคลียแรนซ์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของขอบตัดรูเจาะในขณะเจาะรูด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ผลการทดลองพบว่า ขอบตัดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบสามารถสร้างรอยตัดเฉือนได้ยาวมาก แต่เมื่อระยะเคลียแรนซ์กว้างขึ้นพบว่ารอยตัดเฉือนลดลง สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษพบว่าขอบตัดมีรอยตัดเฉือนสั้นมาก เมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบ (3-5%) ขอบตัดมีรอยตัดเฉือนสั้น เนื่องจากความสามารถในการยืดตัวต่ำ ดังนั้นการใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบจึงไม่สามารถสร้างรอยตัดเฉือนได้ เมื่อระยะเคลียแรนซ์กว้างขึ้น (8-10%) รอยตัดเฉือนยาวขึ้น อย่างไรก็ตาม รอยตัดเฉือนลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเคลียแรนซ์กว้างเกินกว่า 10% จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่าความแตกต่างของระยะเคลียแรนซ์ส่งผลต่อรอยตัดเฉือนของรูเจาะของทั้งเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: เคลียแรนซ์, เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, รอยตัดเฉือน, กระบวนการเจาะรู

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ถนนเพชรเกษม ต.หนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Faculty of Industrial and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Petchkasem Road, Nong Kae, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan 77110, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): wichai.poo@rmutr.ac.th Tel: 08 2899 3153

ABSTRACT

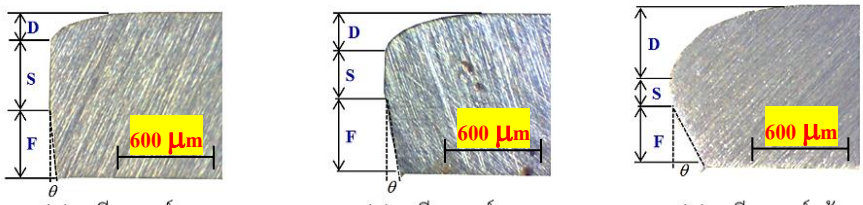
The objective of this research is to study the metamorphosis behavior of the sheared edge of piercing hole on high and ultra-high strength steel sheet at four levels of the clearance: 3%, 10%, 20% and 40%. The different grades of high and ultra-high strength steel sheet with 1.2 mm thickness were tested with the circular piercing punch with 20 mm diameter. The tooling was produced from cold work tool steel grade SKD11 (JIS) with high hardness level at 60±2 HRC. The finite element technique combined with statistical analysis was performed to investigate the effect of the die clearance on the metamorphosis behavior of the sheared edge of piercing hole during the piercing process. The experimental results showed that the long shear surface was observed for high strength steel workpieces at the narrow clearance. While the clearance increased, the shear surface of piercing hole decreased. For ultra-high strength steels, the small shear surface was found for the piercing at the narrow clearance (3-5%) because of low elongation characteristic. Therefore, the narrow clearance was unable to produce the long-sheared surface. When applying the wider clearance at (8-10%), the sheared surface was longer. However, the sheared surface gradually reduced when the clearance was wider than 10%. Results from statistical analysis emphasized that the difference in clearance distance significantly influenced the sheared surface of piercing hole for both high and ultra-high strength steels.

Key words: clearance, high strength steel, sheared surface, piercing process

บทนำ

กระบวนการเจาะรู (Piercing process) แม้ว่าเป็นงานพื้นฐานของอุตสาหกรรมปั๊มชิ้นส่วนโลหะที่ดูเหมือนไม่ซับซ้อนนักแต่ก็นับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากการเจาะรูต้องคำนึงถึงการนำรูไปใช้ในกระบวนการต่อไป โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่ใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเข้ามาทดแทนเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งสามารถลดน้ำหนักของตัวถังรถยนต์ไปได้มาก และในอนาคตโครงสร้างของรถยนต์มีการใช้เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงเกินกว่า 1 GPa ด้วยเหตุนี้ฐานข้อมูลของกระบวนการเจาะรูบนวัสดุชนิดใหม่จึงสำคัญและมีความจำเป็นมาก จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยหลายชิ้นที่วิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเจาะรูบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงอาทิเช่น การอธิบายอิทธิพลของระยะเคลียแรนซ์ในกระบวนการตัดชิ้นงานแม่พิมพ์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Hambli *et al*., 2003) การเสนอการวิเคราะห์ตัวแปรของการตัดแผ่นทองแดงด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ระยะเคลียแรนซ์ รูปร่างของชิ้นงาน โดยนำเสนอสมบัติวิสโคอิลาสติกแบบใหม่เพื่อทำนายการแตกหักที่แม่นยำ นำไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดรอยตัดเฉือน (Husson *et al.*, 2008) รัศมีขนาดเล็กบริเวณคมตัดของพันช์และดายพร้อมทั้งใช้ระยะเคลียแรนซ์ที่แคบมาก ในการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงทำให้รอยตัดเฉือนยาวมากขึ้น (Mori *et al*., 2013) การศึกษาผลกระทบของระยะเคลียแรนซ์ในกระบวนการตัดด้วยพันช์สี่เหลี่ยมและมีรัศมีที่มุมเพื่อยืดอายุการใช้งานให้ได้มากที่สุด (Subramonian *et al*., 2013b) และในปีเดียวกัน มีการศึกษาแรงในกระบวนการตัด

ความเร็วสูงสำหรับชิ้นส่วนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Subramonian *et al*., 2013a) วิเคราะห์กลไกการแตกหักบริเวณขอบรูในระหว่างการเจาะรูบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงจากนั้นนำรูไปเข้าสู่กระบวนการขยายรู (Wang *et al*., 2014) วิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการตัดความเร็วสูงบนวัสดุ Bronze C5191 (Hu *et al*., 2015) สร้างวิธีการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานด้วยวิธีการตัดละเอียด (Fine blanking) แบบใหม่โดยไม่ใช้แหวนจิก (V-Ring) ทำให้ลดความยุ่งยากในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์แต่ยังได้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง (Wang, 2015) อีกทั้งศึกษาขอบตัดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเพื่อจะนำไปเข้าสู่กระบวนการขยายรู โดยมุ่งเน้นพฤติกรรมการแตกของรู (Wang *et al*., 2015) การศึกษาการสึกหรอของพันช์ที่ความแข็งต่างกันในกระบวนการตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ต่างกัน (Akyürek *et al*., 2017) การศึกษาผลกระทบจากการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษที่มีความแข็งแรงเกินกว่า 1 GPa เช่น การโก่งตัวของพันช์ ประเภทของการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ผ่านทางการทดลองและการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Won *et al*., 2018) การวิเคราะห์อิทธิพลของระยะเคลียแรนซ์ที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดรอยแตกบนชิ้นงานในการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดใหม่ซึ่งมีส่วนผสมแมงกานีส (Chang *et al*., 2018) การเปลี่ยนแปลงของขอบตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการตัดจากดายที่มีมุมหลบ (Die angular) แตกต่างกันผ่านการทดลอง 1 แสนครั้ง (Jaafar *et al*., 2019) การศึกษากลไกการแตกที่เกิดขึ้นกับขอบของรูบนวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าความแข็งแรงเกรดพิเศษ (He *et al*., 2019) การพัฒนากระบวนการตัดขอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยการใช้พันช์เอียง 0, 30 และ 45 องศา ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มระยะรอยตัดเฉือนได้เนื่องจากการเอียงพันช์สามารถชะลอการเชื่อมต่อกันของความเค้นดึงส่งผลให้การแตกเกิดขึ้นช้า (Komgrit and Pongsakorn, 2019) ในส่วนการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเกรนแตกต่างกัน ด้วยกระบวนการตัดโลหะโดยการตัดชิ้นงานด้วยเคลียแรนซ์ในระดับที่แตกต่างกัน สังเกตคุณภาพชิ้นงานที่เปลี่ยนไปและค้นหาเคลียแรนซ์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางไฟไนท์เอลิเมนต์ (He *et al*., 2020) ในปี 2020 มีการนำเสนอการตัดด้วยพันช์ที่มีบ่าโดยเรียกว่า “Humped bottom punch” (Won *et al*., 2020) เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานและป้องกันการแตกร้าวบริเวณขอบรูบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง จากงานวิจัยหลายเรื่องดังที่ได้กล่าวมาแล้วแสดงให้เห็นถึงความน่าสนใจในการพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ หากแต่ว่าข้อมูลของการเลือกใช้ระยะเคลียแรนซ์แนะนำเป็นช่วงๆ เมื่อผู้วิจัยทำการทดลองเบื้องต้นโดยใช้ค่าระยะเคลียแรนซ์แนะนำได้ผลการตัดแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งไม่เพียงพอโดยเฉพาะกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมากที่มีอัตราการยืดตัวต่ำ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการทดลองศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขอบตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษในกระบวนการเจาะรูด้วยแม่พิมพ์ที่ระยะเคลียแรนซ์แตกต่างกันเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการเลือกใช้อย่างถูกต้องต่อไป



(ก) เคลียแรนซ์แคบ (ข) เคลียแรนซ์เหมาะสม (ค) เคลียแรนซ์กว้าง

****D:Die roll, S:Sheared surface, F:Fracture surface****

ภาพที่ 1 ลักษณะขอบตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ได้จากการตัดที่ระยะเคลียแรนซ์ต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการตัดชิ้นงานเหล็กแผ่นลักษณะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ความหนา 1.2 มม. กำหนดชิ้นงานเป็นสองกลุ่มคือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y, และ 780G กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 980Y และ 1180Y ทั้งหมดมีความหนา 1.2 มม. วัสดุทำแม่พิมพ์คือเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด JIS; SKD11 ชุบแข็งที่ระดับความแข็งสูงสุด 60±2 HRC ใช้ระยะเคลียแรนซ์ในการทดลองทั้งหมด 4 ระดับ คือ ได้แก่ 3%, 10%, 20% และ 40% ของความหนาชิ้นงาน เพื่อให้ได้ความเที่ยงตรงสูงสุดพันช์และดายถูกประกอบบนดายเซ็ทแบบสี่เสาพร้อมกับเครื่องป้อนชิ้นงานอัตโนมัติ ดังภาพที่ 2(ก) ติดตั้งเข้ากับเครื่องปั๊มโลหะแบบเพลาข้อเหวี่ยงขนาด 60 ตัน ดังภาพที่ 2(ข) วัสดุชิ้นงานได้รับการทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงดังภาพที่ 2(ค)

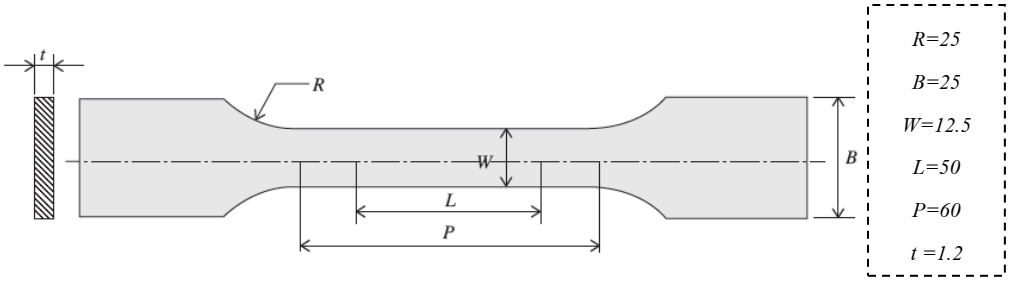
(ก) พันช์-ดายและดายเซท (ข) เครื่องปั๊มโลหะ (ค) เครื่องทดสอบแรงดึง

ภาพที่ 2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

2. การจำลองการตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานขณะทำการเจาะรูด้วยวิธีการทางไฟไนท์ เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Deform 2D Version 7.2 แบบ Perpetual license และเพื่อให้ผลการคำนวณถูกต้องการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำคัญมากดังนั้นจึงต้องทดสอบหาความเค้นจริง-ความเครียดจริง (True stress-strain)

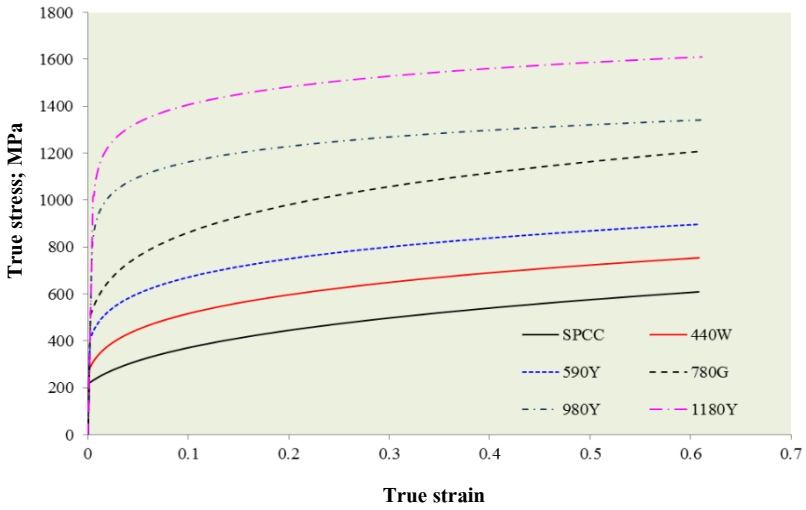
ผู้วิจัยจึงเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงด้วยมาตรฐานญี่ปุ่น JIS13-B ดังภาพที่ 3 พร้อมติดตั้งสเตรนเกจเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของชิ้นทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ภายหลังการทดสอบสามารถคำนวณความเค้นจริง-ความเครียดจริงได้ดังภาพที่ 4 และสามารถสรุปถึงสมบัติทางกลของแต่ละวัสดุได้ดังตารางที่ 1 สำหรับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดให้พันช์ ดายและแผ่นกดชิ้นงานมีเป็นสมบัติแข็งเกร็ง (Rigid body) ส่วนวัสดุชิ้นงานให้เปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) พิกัดแบบสองมิติรอบแกน (Half model) ใช้เอลิเมนต์สำหรับชิ้นงาน 3000 เอลิเมนต์ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคือ 0.1 เลือกใช้เกณฑ์การขาด (Critical damage value) ของ Cockroft&Latham



ภาพที่ 3 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS13-B (หน่วยเป็น มม.)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน

Mechanical Properties	**Workpiece Materials**					
	SPCC	**440W**	**590Y**	**780G**	**980Y**	**1180Y**
Yield strength (MPa)	215	339	405	512	707	823
Tensile strength (MPa)	321	460	619	807	1060	1285
Stress coefficient (K) (MPa)	415	817	1020	1320	1630	1695
Strain hardening exponent (n)	0.16	0.14	0.21	0.22	0.12	0.07
Critical damage value; (C) (Cockroft & Latham)	1.47	1.12	1.135	1.15	1.05	1.08

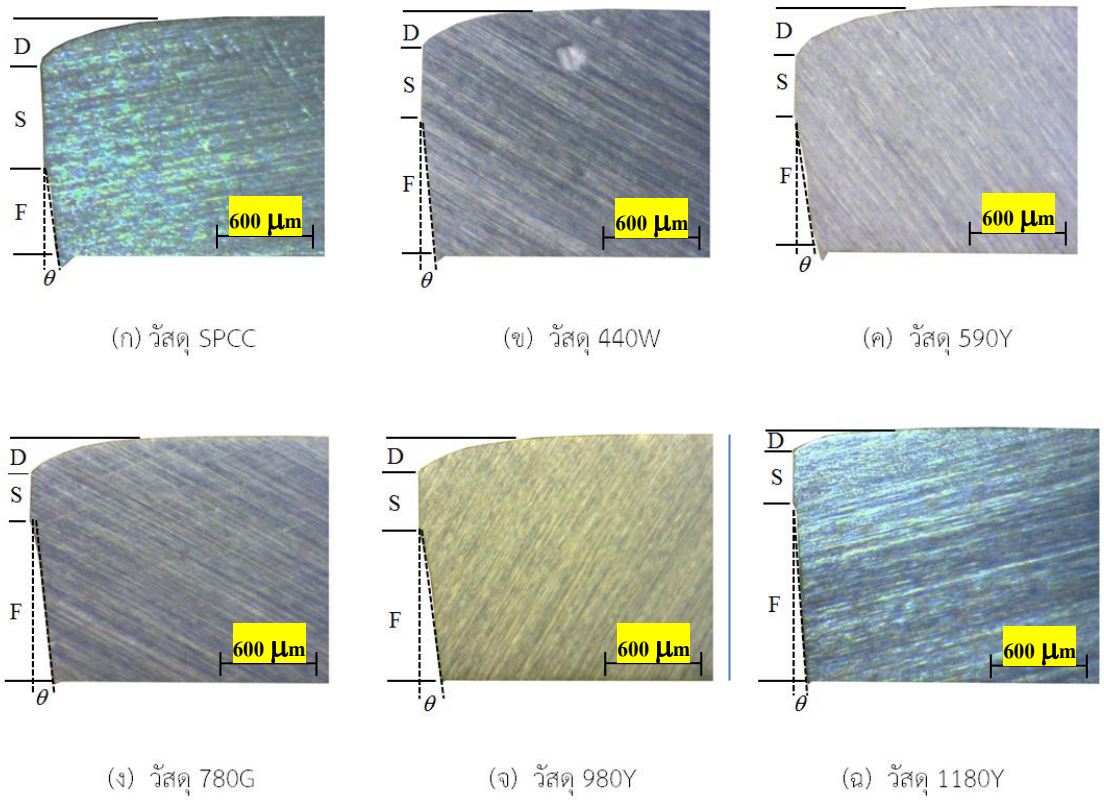


ภาพที่ 4 ความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุชิ้นงาน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของขอบตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

เพื่อแสดงให้เห็นถึงภาพรวมของขอบตัดวัสดุชิ้นงานที่มีอยู่ในทุกอุตสาหกรรมอย่างชัดเจน จึงได้นำเสนอชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC เพิ่มเข้ามาในการทดลอง เนื่องจากเป็นเหล็กที่ถูกใช้งานมาอย่างยาวนานและมีปรากฏอยู่ในทุกอุตสาหกรรมในประเทศและต่างประเทศ รูปตัดขวางของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษเมื่อตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ 10% แสดงในภาพที่ 5 รายละเอียดบนขอบตัดคือ ส่วนโค้งมน; D, รอยตัดเฉือน;S และ รอยฉีกขาด;F จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าขอบตัดเหล็กต่างชนิดกันเมื่อตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์เท่ากันพบว่าส่วนต่างๆ บนขอบตัดแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ภาพที่ 5(ก) คือรูปตัดขวางของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC พบส่วนโค้งมน, รอยตัดเฉือน, รอยฉีกขาดและมีมุมเอียงของชิ้นงานชัดเจน ในภาพที่ 5(ข) - (ค) แสดงภาพตัดขวางของเหล็ก 440W และ 590Y พบว่ามีส่วนโค้งมน, รอยตัดเฉือน, รอยฉีกขาดและมีมุมเอียงของชิ้นงานใกล้เคียงกันแต่ส่วนโค้งมนจะมีน้อยกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC กรณีเหล็ก 780G และ 980Y ในภาพที่ 5(ง) - (จ) พบความแตกต่างกันของรอยฉีกขาดที่ยาวมากและมีรอยตัดเฉือนและส่วนโค้งมนเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาเหล็ก 1180Y ภาพที่ 5(ฉ) พบว่ารอยฉีกขาดยาวมาก มีรอยตัดเฉือนและส่วนโค้งมนเพียงเล็กน้อย จากผลการตัดชิ้นงานสามารถสรุปได้ว่า หากใช้ระยะเคลียแรนซ์เท่ากันนั้นไม่สามารถตอบสนองการใช้งานในปัจจุบันได้ทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ในส่วนของพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของขอบตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษในขณะตัดชิ้นงานถูกนำเสนอด้วยการจำลองการตัดด้วยคอมพิวเตอร์ดังต่อไปนี้



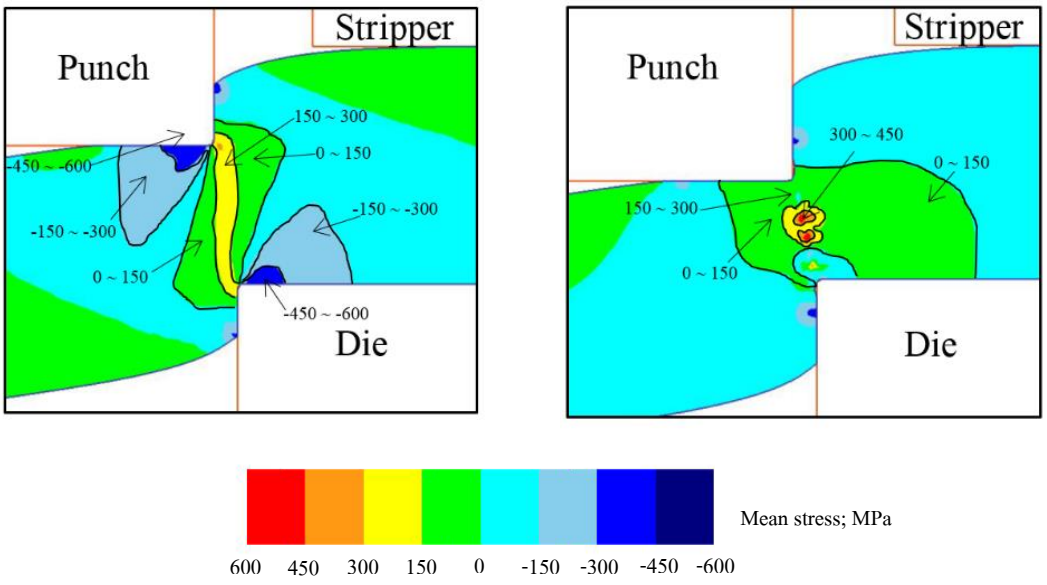
(ก) วัสดุ SPCC (ข) วัสดุ 440W (ค) วัสดุ 590Y

(ง) วัสดุ 780G (จ) วัสดุ 980Y (ฉ) วัสดุ 1180Y

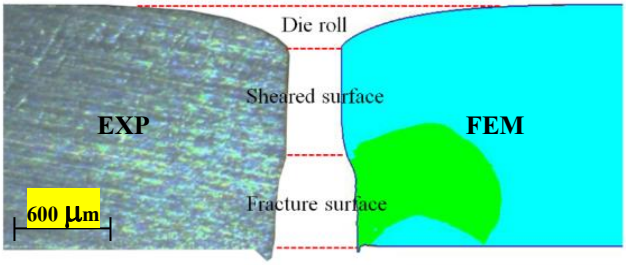
ภาพที่ 5 รอยตัดขวางของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษที่ระยะเคลียแรนซ์ 10%

สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในระหว่างการตัดชิ้นงานนั้นเริ่มนำเสนอการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับชิ้นงานที่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ที่มีระดับความแข็งแรงต่ำสุด (ยืดตัวได้ดีที่สุด) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ซึ่งมีความแข็งแรงสูงมากที่สุด (การยืดตัวต่ำที่สุด) เนื่องจากทั้งสองวัสดุมีอัตราการยืดตัวต่างกันมากดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบระยะกินลึกที่ตำแหน่งเดียวกันได้

การทดลองพบว่า การกระจายตัวของความเค้นกรณีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ในขณะตัดชิ้นงานที่ระยะกินลึก 0.5 มม. ดังภาพที่ 6(ก) พบความเค้นดึงสูงสุดมีค่าระหว่าง 150 ~ 300 MPa บริเวณปลายคมตัดพันช์เชื่อมยาวไปถึงปลายคมตัดของดาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการตัดขอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยพันช์เอียง (Komgrit and Pongsakorn, 2019) และเมื่อพันช์กดลึกลงไปกระทั่งระยะ 0.7 มม. ซึ่งเป็นช่วงที่ก่อนที่ชิ้นงานจะแยกออกจากกัน ดังแสดงในภาพที่ 6(ข) พบการกระจายตัวของความเค้นดึงค่าระหว่าง 300 ~ 450 MPa เกิดขึ้นที่กลางชิ้นงาน แสดงว่าชิ้นงานเริ่มแยกตัวออกจากกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีระยะกินลึก 0.7 มม. (ระยะกินลึกคือส่วนโค้งมน+รอยตัดเฉือน) ซึ่งขอบตัดชิ้นงานที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับขอบตัดจริงวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC แสดงในภาพที่ 6(ค)



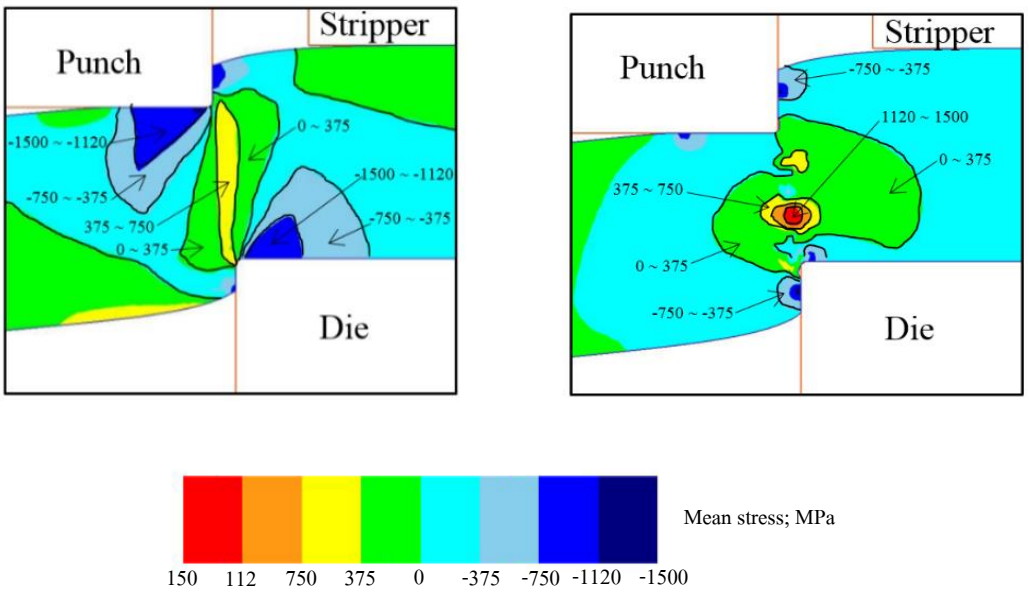
(ก) ระยะกินลึก 0.5 มม. (ข) ระยะกินลึก 0.7 มม.



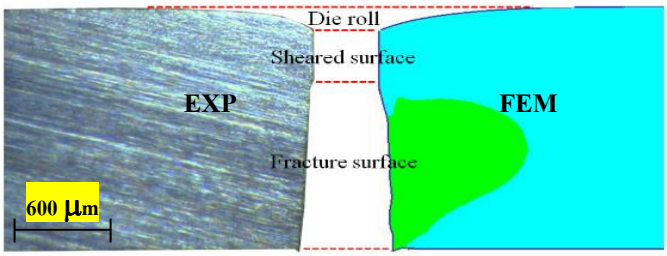
(ค) การเปรียบเทียบขอบตัดระหว่างชิ้นงานจริงและการคำนวณ

ภาพที่ 6 การกระจายตัวของความเค้นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC

ในการจำลองการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ที่ระยะกินลึก 0.35 มม. ดังภาพที่ 7(ก) พบว่าความเค้นดึงสูงสุดมีค่าระหว่าง 375 ~ 750 MPa เกิดขึ้นที่ปลายคมตัดพันธ์เชื่อมยาวไปถึงปลายคมตัดดาย เมื่อเพิ่มระยะกินลึกเพียงเล็กน้อย (ที่ระยะ 0.4 มม.) ดังภาพที่ 7(ข) ความเค้นดึงค่าระหว่าง 1120 ~ 1500 MPa เกิดขึ้นที่กลางชิ้นงาน จากนั้นชิ้นงานจึงขาดออกจากกัน ทำให้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ระยะกินลึกน้อยมากเพียง 0.4 มม. เท่านั้น ขอบตัดชิ้นงานที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับขอบตัดจริงวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y แสดงในภาพที่ 7(ค) จากผลการจำลองการตัดของทั้งสองวัสดุสามารถสรุปสาเหตุที่ความยาวของรอยตัดเฉือนแตกต่างกันได้จากความเค้นดึงที่เชื่อมต่อกันจากคมตัดพันช์มาสู่คมตัดดาย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ความเค้นดึงเชื่อมต่อที่ระยะกินลึก 0.5 มม. ในขณะที่เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ความเค้นเชื่อมต่อที่ระยะกินลึก 0.35 มม. ส่งผลให้รอยตัดเฉือนแตกต่างกันนั่นเอง



(ก) ระยะกินลึก 0.35 มม. (ข) ระยะกินลึก 0.4 มม.

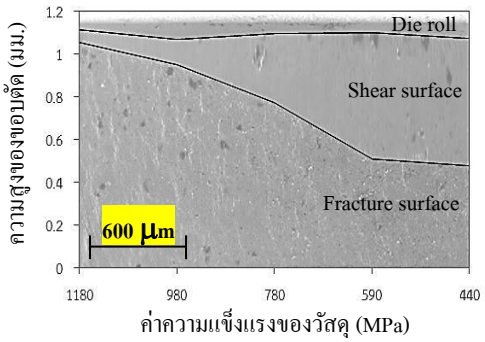


(ค) การเปรียบเทียบขอบตัดระหว่างชิ้นงานจริงและการคำนวณ

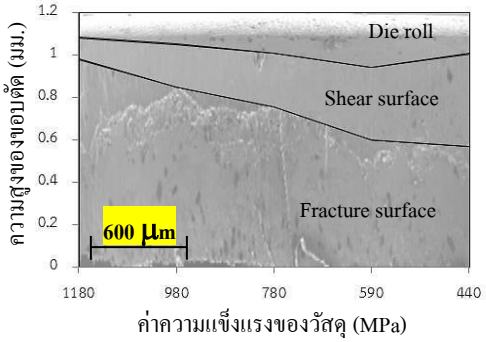
ภาพที่ 7 การกระจายตัวของความเค้นวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y

2. ระดับความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดชิ้นงาน

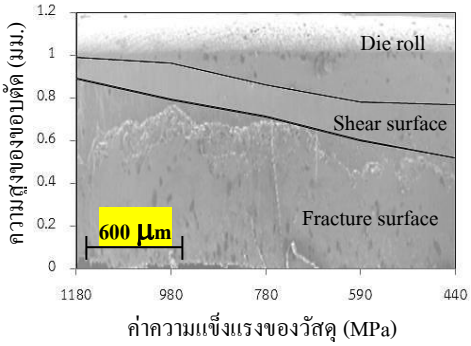
ในขั้นตอนทั่วไปของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขอบตัดของแต่ละวัสดุเมื่อถูกตัดด้วยแม่พิมพ์สามารถสังเกตได้จากภาพที่ 5(ก) - (ฉ) ในหัวข้อก่อนหน้า และบทวิเคราะห์ต่อไปนี้จึงนำผลที่ได้จากการตัดวัสดุที่มีความแข็งแรงและระยะเคลียแรนซ์แตกต่างกันนำมาสร้างเป็นกราฟต่อเนื่องกันด้วยซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอ็กเซล จากนั้นใส่กราฟฟิกแสดงส่วนที่เป็นส่วนโค้งมน, รอยตัดเฉือน และรอยฉีกขาด ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของขอบตัดเมื่อผ่านการตัดในแต่ละระยะเคลียแรนซ์อย่างชัดเจน ซึ่งผู้วิจัยนำเสนอการเปลี่ยนแปลงของขอบตัดชิ้นงานเมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์ในการทดลองทั้งหมด 4 ระดับ คือ 3%, 10%, 20% และ 40% ดังภาพที่ 8(ก) - (ง)



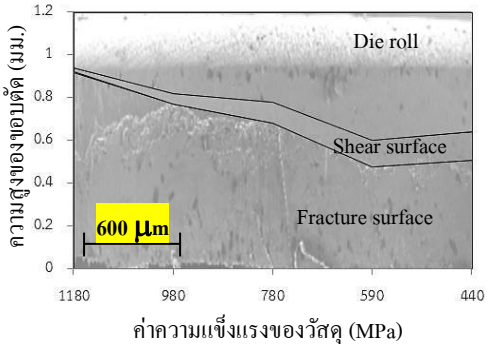
(ก) ระยะเคลียแรนซ์ 3%



(ข) ระยะเคลียแรนซ์ 10%



(ค) ระยะเคลียแรนซ์ 20%

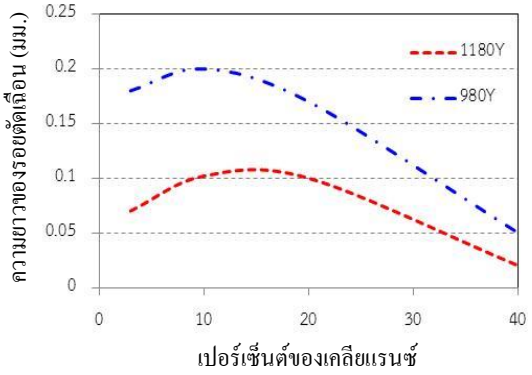


(ง) ระยะเคลียแรนซ์ 40%

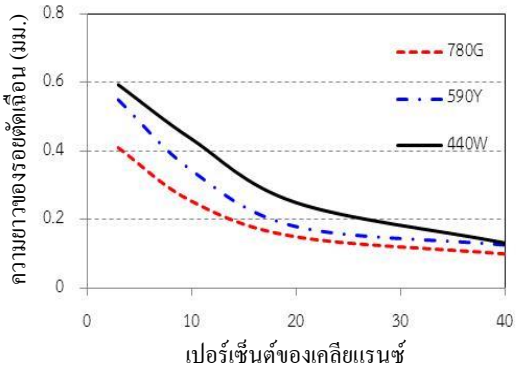
ในบทวิจารณ์นี้มิได้นำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC มาร่วมวิเคราะห์เนื่องจากอยู่นอกกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ภาพที่ 8 ความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขอบตัด

เมื่อพิจารณาขอบตัดของวัสดุต่างๆ ที่ระยะเคลียแรนซ์ 3% ดังภาพที่ 8(ก) พบว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ 1180 MPa มีรอยตัดเฉือนสั้นที่สุดและรอยตัดเฉือนมีแนวโน้มยาวขึ้นเรื่อยๆ เมื่อตัดด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำ และที่ระยะเคลียแรนซ์ 10%, 20% และ 40% ดังภาพที่ 8(ข) - (ง) มีการเปลี่ยนแปลงของขอบตัดแนวโน้มเดียวกันทั้งหมดทุกระยะเคลียแรนซ์



(ก) กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ



(ข) กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนเมื่อตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ต่างกัน

จากภาพที่ 9(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนของกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษพบว่ารอยตัดเฉือนของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษแคบมากเมื่อตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์แคบ (3%) และเมื่อเคลียแรนซ์กว้างขึ้นรอยตัดเฉือนจึงเริ่มยาวขึ้นและกลับไปลดลงอีกครั้งเมื่อระยะเคลียแรนซ์มากเกินกว่า 20% ในขณะที่กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ขนาดของรอยตัดเฉือนจะยาวเมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบในการตัดและเมื่อระยะเคลียแรนซ์กว้างขึ้นเรื่อยๆ รอยตัดเฉือนจึงลดสั้นลง (Hambli *et al*., 2003) ตามลำดับ ดังภาพที่ 9(ข) อย่างไรก็ตามเมื่อกลับไปวิเคราะห์จากทฤษฎีการกำหนดคุณภาพชิ้นงานของงานแม่พิมพ์ตัด ที่กล่าวว่า การใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบจะได้รอยตัดเฉือนที่ยาว ชิ้นงานที่ได้จะมีความเที่ยงตรงสูง (He *et al*., 2019) ผลการทดลองนี้สามารถสนับสนุนทฤษฎีที่ผ่านมาได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงที่ 440-590 MPa ที่จัดอยู่ในกลุ่มเริ่มต้นของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง พบรอยตัดเฉือนยาวสอดคล้องกับทฤษฎีระยะเคลียแรนซ์ในงานแม่พิมพ์ตัด หากแต่ว่าเมื่อตัดชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงมากเกินกว่า 1 GPa ควรจะเริ่มต้นการตัดชิ้นงานด้วยระยะเคลียแรนซ์ 10-20% จะทำให้พบรอยตัดเฉือนบนชิ้นงาน หากออกแบบระยะเคลียแรนซ์แคบๆ ตามหลักการตัดเหล็กกล้าทั่วไปที่ประมาณ 3-5% จะพบรอยตัดเฉือนน้อยมาก แต่จะได้รอยฉีกขาดเข้ามาแทนที่ทำให้ชิ้นงานขาดความเที่ยงตรง

3. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติ

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนเมื่อตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ต่างกันดังภาพที่ 10 ได้นำเสนอการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อค้นหาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการนำไปเลือกใช้ค่าเคลียแรนซ์ที่เหมาะสม โดยสมมติฐานในการทดสอบคือ

H_0 = ค่าความต่างของระยะเคลียแรนซ์ไม่มีผลต่อรอยตัดเฉือน

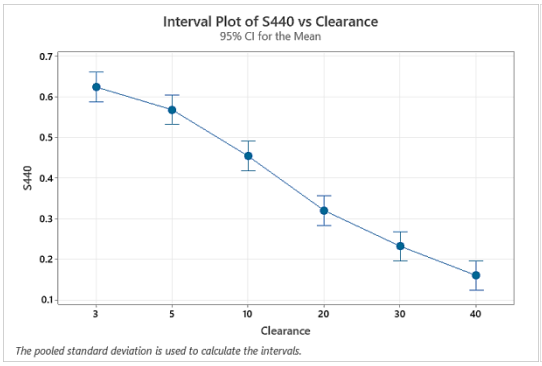
H_1 = ค่าความต่างของระยะเคลียแรนซ์มีผลต่อรอยตัดเฉือน

ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่าค่า *p*-value มีค่าน้อยมากแสดงดังตารางที่ 2 ทำให้สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ และสรุปได้ว่าระยะเคลียแรนซ์ที่ต่างกันส่งผลให้รอยตัดเฉือนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จาก Interval plot ในภาพที่ 10 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลียแรนซ์กับรอยตัด

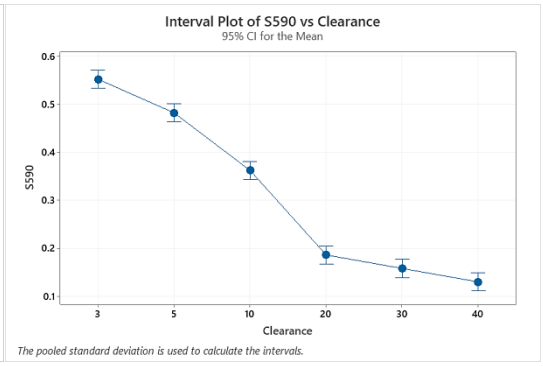
เฉือน มีลักษณะเป็นเส้นตรง จึงใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Liner regression analysis) ซึ่งสามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของรอยตัดเฉือนและระยะเคลียแรนซ์ ได้ดังตารางที่ 3 และเส้นกราฟของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของเหล็กชนิดต่างๆ ได้ดังแสดงภาพที่ 11(ก) - (ค) ผลสรุปความแม่นยำของตัวแบบทางคณิตศาสตร์แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

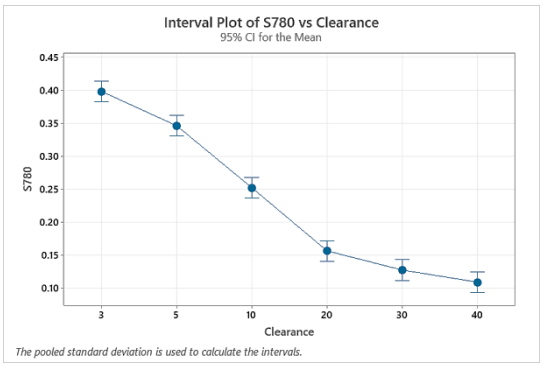
Materials	**Source**	**DF**	**Adj SS**	**Adj MS**	**F-Value**	***p*-Value**
440W	Clearance	5	0.86623	0.173246	111.77	0.000
	Error	24	0.03720	0.001550		
	Total	29	0.90343			
590Y	Clearance	5	0.80858	0.161715	386.57	0.000
	Error	24	0.01004	0.000418		
	Total	29	0.81862			
780G	Clearance	5	0.363679	0.072736	254.08	0.000
	Error	24	0.006870	0.000286		
	Total	29	0.370549			



(ก) 440W



(ข) 590Y



(ค) 780G

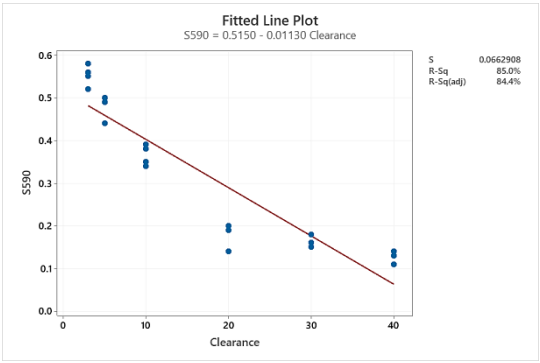
ภาพที่ 10 Interval plot ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

ตารางที่ 3 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

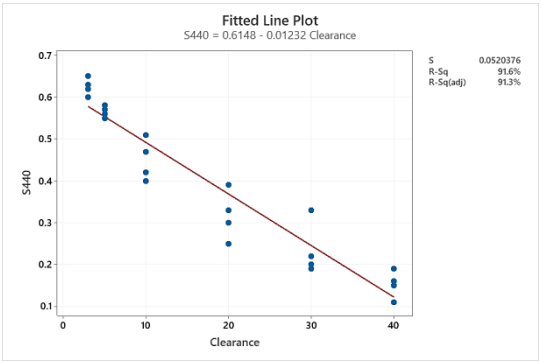
Material	Model
The regression equation for 440w	Sheared surface = 0.6148 - 0.01232(Clearance)
The regression equation for 590Y	Sheared surface = 0.5150 - 0.01130(Clearance)
The regression equation for 780G	Sheared surface = 0.3676 - 0.007564(Clearance)

ตารางที่ 4 ผลสรุปความแม่นยำของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

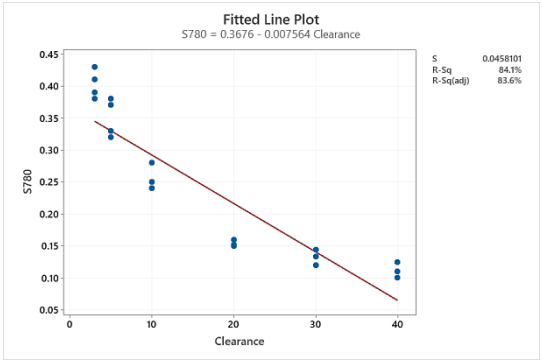
Material	S	R-sq	R-sq(adj)
440W	0.0520376	91.61%	91.31%
590Y	0.0169194	98.15%	97.76%
780G	0.0458101	84.14%	83.58%



(ก) 440W



(ข) 590Y



(ค) 780G

ภาพที่ 11 Fit curve ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ ประกอบด้วย 980Y และ 1180Y สามารถวิเคราะห์ด้วย ANOVA โดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

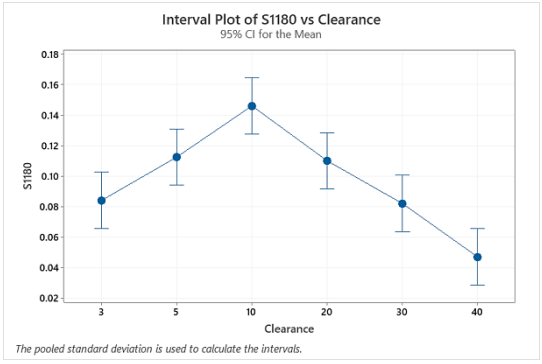
H_0 = ค่าความต่างของระยะเคลียแรนซ์ไม่มีผลต่อรอยตัดเฉือน

H_1 = ค่าความต่างของระยะเคลียแรนซ์มีผลต่อรอยตัดเฉือน

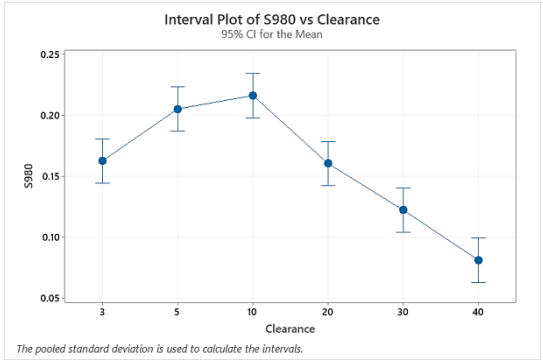
ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่าค่า *p*-value มีค่าน้อยมากดังตารางที่ 5 จึงสามารถทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลักได้และสรุปได้ว่าระยะเคลียแรนซ์ต่างกันส่งผลให้รอยตัดเฉือนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จาก Interval plot ดังภาพที่ 12 พบความแตกต่างจากกลุ่มของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G คือมีลักษณะเปลี่ยนไปตามช่วงของระยะเคลียแรนซ์กล่าวคือ ในกรณีของเหล็ก 980Y เมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์ 3% ตัดชิ้นงาน รอยตัดเฉือนจะมีโอกาสเท่ากับระยะเคลียแรนซ์ 20% และในกรณีของเหล็ก 1180Y หากตัดด้วยเคลียแรนซ์ 3% รอยตัดเฉือนมีโอกาสเท่ากับ 30% จากผลการทดลองในหัวข้อระดับความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดชิ้นงาน พบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษพบรอยตัดเฉือนยาวสุดในช่วงเคลียแรนซ์ 10% และรอยตัดเฉือนเริ่มสั้นลงเรื่อยๆ เมื่อเคลียแรนซ์กว้างขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ตามทฤษฎีการตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ ที่ให้ไว้ว่าหากเลือกตัดหรือเจาะชิ้นงานด้วยระยะเคลียแรนซ์แคบจะได้รอยตัดเฉือนที่ยาว หากแต่ว่าสำหรับการทำงานบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษนั้นต้องหาค่าระยะเคลียแรนซ์ที่เหมาะสมในการตัด

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 980Y และ 1180Y

Materials	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	*p*-Value
980Y	Clearance	5	0.064109	0.012822	33.17	0.000
	Error	24	0.064109	0.012822		
	Total	29	0.009276	0.000387		
1180Y	Clearance	5	0.028505	0.005701	14.26	0.000
	Error	24	0.009595	0.000400		
	Total	29	0.038101			



(ก) 980Y



(ค) 1180Y

ภาพที่ 12 Interval plot ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 980Y และ 1180Y

สรุป

ภายหลังทำการทดลองด้วยการตัดชิ้นงานและพิสูจน์ถึงกลไกการเปลี่ยนรูปของวัสดุด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์รวมทั้งวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อการเลือกใช้ระยะเคลียแรนซ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษนั้น ผู้วิจัย

แนะนำให้แบ่งระดับความแข็งแรงออกเป็นสองกลุ่ม เพื่อเป็นข้อพิจารณาสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโลหะและโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่ใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษเป็นวัสดุชิ้นงานได้ดังนี้

1. กลุ่มของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G สามารถเลือกตัดชิ้นงานด้วยเคลียแรนซ์ 3-10%

2. กลุ่มของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 980Y และ 1180Y ควรเลือกตัดชิ้นงานด้วยเคลียแรนซ์ประมาณ 10%

3. การเลือกใช้ระยะเคลียแรนซ์นั้นควรพิจารณาหลายมิติ เช่น แรงในการตัดชิ้นงาน การสึกหรอที่จะเกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ การใช้เคลียแรนซ์ที่แคบมากทำให้การสึกหรอเกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ อีกทั้งมีความเสี่ยงจากความเสียหายเนื่องจากการทดลองพิมพ์ (Try out) โดยเฉพาะกับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ต้องการแรงในการตัดค่อนข้างสูง ขณะที่หากใช้ระยะเคลียแรนซ์ที่กว้างเกินไป ปัญหาจากการสึกหรอและการลองพิมพ์จะเกิดขึ้นน้อยแต่ชิ้นงานก็จะได้คุณภาพต่ำ (ส่วนโค้งมนและรอยฉีกขาดยาว ครีบหนา) ดังนั้นผู้ออกแบบแม่พิมพ์ตัดจะต้องพิจารณาให้รอบคอบถึงตัวแปรดังกล่าวด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในการสนับสนุนโปรแกรม Finite element ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงาน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์สุวดี นำพาเจริญ ให้คำแนะนำสถิติวิเคราะห์ ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Akyürek, F., Yaman, K. and Tekiner, Z. 2017. An Experimental Work on Tool Wear Affected by Die Clearance and Punch Hardness. **Arabian Journal for Science and Engineering** 42(11): 4683-4692.

Chang, Y., Han, S., Li, X., Wang, C., Zheng, G. and Dong, H. 2018. Effect of shearing clearance on formability of sheared edge of the third-generation automotive medium-Mn steel with metastable austenite. **Journal of Materials Processing Technology** 259: 216-227.

Hambli, R., Richir, S., Crubleau, P. and Taravel, B. 2003. Prediction of optimum clearance in sheet metal blanking processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 22: 20-25.

He, J., Li, S. and Dong, L. 2020. Experiments and FE simulation of edge cracking considering prehardening after blanking process. **International Journal of Material Forming** 13(4): 547-560.

He, J., Wang, Z., Li, S., Dong, L., Cao, X. and Zhang, W. 2019. Optimum clearance determination in blanking coarse-grained non-oriented electrical steel sheets: experiment and simulation. **International Journal of Material Forming** 12(4): 575-586.

Hu, D.C., Chen, M.H., Ouyang, J.D. and Yin, L.M. 2015. Finite element analysis of the thermal effect in high-speed blanking of thick sheet metal. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 80(9): 1481-1487.

Husson, C., Correia, J.P.M., Daridon, L. and Ahzi, S. 2008. Finite elements simulations of thin copper sheets blanking: Study of blanking parameters on sheared edge quality. **Journal of Materials Processing Technology** 199: 74-83.

Jaafar, N.A., Abdullah, A.B. and Samad, Z. 2019. Effect of punching die angular clearance on punched hole quality of S275 mild steel sheet metal. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 101(5): 1553-1563.

Komgrit, L. and Pongsakorn, L. 2019. FE Simulations and Experimental Analysis of the Blade Angle Effect on Sheared Surface in Trimming Process of Advanced High-Strength Steel Sheet. **Arabian Journal for Science and Engineering** 44(9): 7909-7918.

Mori, K., Abe, Y., Kidoma, Y. and Kadarno, P. 2013. Slight clearance punching of ultra-high strength steel sheets using punch having small round edge. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 65: 41-46.

Subramonian, S., Altan, T., Campbell, C. and Ciocirlan, B. 2013a. Determination of forces in high speed blanking using FEM and experiments. **Journal of Materials Processing Technology** 213(12): 2184-2190.

Subramonian, S., Altan, T., Ciocirlan, B. and Campbell, C. 2013b. Optimum selection of variable punch-die clearance to improve tool life in blanking non-symmetric shapes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 75: 63-71.

Wang, J.P. 2015. A novel fine-blanking approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 78(5): 1015-1019.

Wang, K., Greve, L. and Wierzbicki, T. 2015. FE simulation of edge fracture considering pre-damage from blanking process. **International Journal of Solids and Structures** 71: 206-218.

Wang, K., Luo, M. and Wierzbicki, T. 2014. Experiments and modeling of edge fracture for an AHSS sheet. **International Journal of Fracture** 187(2): 245-268.

Won, C., Lee, S., Seo, J., Park, S.H. and Yoon, J. 2018. Stripping failure of punching pin in GPa-grade steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 94(1): 73-83.

Won, C., Lee, W., Lee, H.Y., Kang, Y.S. and Yoon, J. 2020. Effect of two-stage press blanking on edge stretchability with third-generation advanced high-strength steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 110(1): 13-27.