

# ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและลักษณะขอบตัดโลหะ แผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ (DP590)

## Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties and Cutting Edge Characteristics of High Strength Steel (DP590)

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ<sup>1\*</sup> พิสิตธี เมืองน้อย<sup>1</sup> นิวัฒน์ มูเก็ม<sup>1</sup> พงศกร หลีตระกูล<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Natthasak Pornputsiri<sup>1\*</sup> Phisith Muangnoy<sup>1</sup> Niwat Mookam<sup>1</sup> Pongsakorn Leetrakul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus,  
Hua-Hin, Prachubkhirikhan, 77110

\*Corresponding author Email: natthasak.por@rmutr.ac.th

(Received: 24 August 2023 / Accepted: 15 December 2023 / Published: 26 December 2023)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ เพื่อปรับปรุงคุณภาพขอบตัด โดยนำโลหะแผ่นไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการอบคืนตัว กระบวนการอบปกติ และกระบวนการอบอ่อน ตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและความสูงส่วนต่าง ๆ ของขอบตัด ซึ่งพบว่ากระบวนการทางความร้อนจะส่งผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล โดยโลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว เฟสมาร์เทนไซต์จะเกิดการแตกตัวละเอียดมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นครากเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวของวัสดุจะมีค่าลดลง สำหรับโลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการอบแบบปกติด้วยอุณหภูมิสูง ทำให้เฟสมาร์เทนไซต์เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์และการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้วัสดุมีโครงสร้างจุลภาคที่ไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงและมีอัตราการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น ส่วนกรณีการอบอ่อน ผลจากการควบคุมให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ภายในเตาทำให้เกรนเกิดการเติบโต ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง ส่วนอัตราการยืดตัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้สมบัติทางกลของโลหะแผ่นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะขอบตัดที่ได้ โดยพบว่าค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะแปรผกผันกับค่าความเค้นครากของวัสดุ ค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึง ค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวของวัสดุ และค่าความสูงครีบบจะแปรผันตามอัตราการยืดตัวของวัสดุ

**คำสำคัญ:** เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง กระบวนการทางความร้อน โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ขอบตัด

### Abstract

This research is study to the effect of heat treatment process of dual phase high strength steel sheets. For improve the quality of the cutting edge by used of different heat treatment processes of sheet metal, which consists of tempering, normalizing and annealing process. Examine the effect on mechanical properties, microstructure and different region heights on the cutting edge. The experiment result that shown that, the heat treatment process affected to changes of the microstructure and mechanical properties of

metal sheets. Where the sheet metal that has undergone a tempering process, the martensite phase have a look more fine, which results in a slight increase in the yield stress, vice versa the tensile strength and elongation was decrease. For the sheet metal that has undergone normalizing processes at Upper-Critical Temperature. This causes the martensite phase to decompose completely and the rapid cooling gives the material a disordered microstructure. As a result, the strength is reduced and the elongation is increased. On the case of annealing process, as a result of slow cooling rate in the furnace, affect to the grain grows. As a result, the strength decreases and elongation significantly increase. The mechanical properties of sheet metal are directly related to the cutting edge characteristics. It was found that the height of the rollover region was inversely proportional to the yield stress of the material. The height of the burnish region is inversely proportional to the tensile strength. The height of fracture region is inversely proportional to the tensile strength and elongation, the burr height is proportional to the elongation of metal sheets.

**Keywords:** High strength steel, Heat treatment process, Microstructure, Mechanical properties, Cutting edge

## 1. บทนำ

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) ถูกใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ ด้วยสมบัติด้านความแข็งแรงที่โดดเด่นและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี จึงนิยมนำไปผลิตเป็นส่วนประกอบหลักของยานยนต์และชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง [1] โดยเหล็กกล้าชนิดเฟสคู่ (Dual phase) เป็นชนิดที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เนื่องจากมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงแต่มีค่าความเค้นครากค่อนข้างต่ำ สามารถเปลี่ยนรูปได้อย่างต่อเนื่องและมีสมบัติด้านความเคียดแข็งสูง [2] จึงมีคุณสมบัติที่ผสมผสานกันระหว่างความสามารถในการขึ้นรูปและมีความแข็งแรงสูง [3] ค่าความแข็งแรงที่โดดเด่นของเหล็กกล้าชนิดนี้เกิดจากองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาคซึ่งประกอบด้วย 2 เฟสหลักคือ เฟสชนิดมาร์เทนไซต์ (Martensitic phase) ที่เกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างเฟอไรต์ (Ferrite matrix) ทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีและมีความแข็งแรงสูง [4] เหมาะสำหรับผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อให้มีน้ำหนักเบา ซึ่งจะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมจากการลดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า ส่วนข้อเสียของเหล็กกล้าชนิดนี้คือ การขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีรัศมีขนาดเล็กหรือมีรูปทรงที่ซับซ้อนมักจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่าย ด้วยความไวในการแตกหักขณะขึ้นรูปแบบเย็น จึงเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยเฉพาะในงานปั๊มตัดโลหะแผ่น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการต่อเนื่องและคุณภาพของข้อต่อของชิ้นงานสำเร็จ

กระบวนการปั๊มตัดงานโลหะแผ่นในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปในประเทศไทย ส่วนใหญ่ได้จากการบวนการตัดเชิงกลหรือเรียกว่า การปั๊มตัดแผ่นเปล่า (Blanking) ที่มีอัตราการผลิตสูง นอกจากนี้ยังมีกระบวนการตัดเฉือนในรูปแบบการตัดเจาะ (Piercing) และการตัดขอบ (Trimming) เพื่อตกแต่งรูปร่างและขนาดของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งคุณภาพของข้อต่อจะส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการผลิตต่อเนื่องและคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยดังกล่าว ส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือหรือแม่พิมพ์เป็นหลัก ซึ่งงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปั๊มตัดโลหะแผ่นได้ชี้ให้เห็นถึงปัญหาและข้อกังวลเกี่ยวกับการตัดโลหะแผ่นชนิดเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ โดยการทดลองและวิเคราะห์ผลจากลักษณะของรอยตัดเฉือนบนขอบตัด ซึ่งองค์ประกอบของขอบตัดโดยทั่วไปมี 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนโค้งมน (Rollover) ส่วนเรียบตรง (Burnish) เรียกอีกอย่างว่าส่วนการตัดเฉือน ส่วนรอยแตก (Fracture surface) หรือเรียกว่าส่วนการแตกร้าว และส่วนของครีบ (Burr) ในบางกรณีอาจมีส่วนเรียบตรงเกิดขึ้น 2 ส่วน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลเกี่ยวกับความไวในการแตกร้าวของวัสดุและระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ [5] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยใช้กระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่ม

ความสามารถในการขึ้นรูปและยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่น่าสนใจ [6–7] เนื่องจากกระบวนการทางความร้อนของโลหะแผ่นส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัว ซึ่งส่งผลต่อการขึ้นรูปและอัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์ และยังสามารถแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทางความร้อนจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการตัดเฉือนของโลหะแผ่นและคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นเพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปตัดโลหะแผ่นเปล่า โดยใช้กระบวนการทางความร้อนในการปรับปรุงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ โดยใช้กระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย การอบคืนตัว (Tempering) การอบแบบปกติ (Normalizing) และการอบอ่อน (Annealing) เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มคุณภาพของขอบตัด โดยประเมินผลจากสมบัติทางกล การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และค่าความสูงของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดชิ้นงานสำเร็จ

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

**2.1 วัสดุการทดลอง** งานวิจัยนี้ใช้โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ความหนา 1 mm. โดยก่อนการทดลองจะนำโลหะแผ่นไปทำการตรวจสอบสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบแรงดึงในทิศทางการรีดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ DP59

Rolling Direction	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Total Elongation (%)
0°	451.30	609.19	22.47
45°	419.80	601.54	28.29
90°	492.35	615.64	23.05

**2.2 กระบวนการทางความร้อน** ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และลักษณะขอบตัดชิ้นทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย

**2.2.1 กระบวนการอบคืนตัว** นำโลหะแผ่นชิ้นทดสอบมาทำการอบให้ความร้อนโลหะแผ่นที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 30 min และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสมาร์เทนไซต์ที่กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลงในขณะที่ค่าความเหนียวจะเพิ่มมากขึ้น [8]

**2.2.2 กระบวนการอบปกติ** สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนโดยปกติจะทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิเหนือเส้นขอบเขตบนของอุณหภูมิวิกฤต (Upper-Critical Temperature,  $A_3$ ) ประมาณ 40 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการอบให้ความร้อนแก่โลหะแผ่นที่อุณหภูมิ 850 °C และคงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลา 2 Hr. เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสมาร์เทนไซต์โดยสมบูรณ์และนำออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศภายนอกเตา

**2.2.3 กระบวนการอบอ่อน** ทำการอบให้ความร้อนชิ้นทดสอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 °C และคงอุณหภูมิดังกล่าวที่ระยะเวลา 1 Hr. จากนั้นจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง

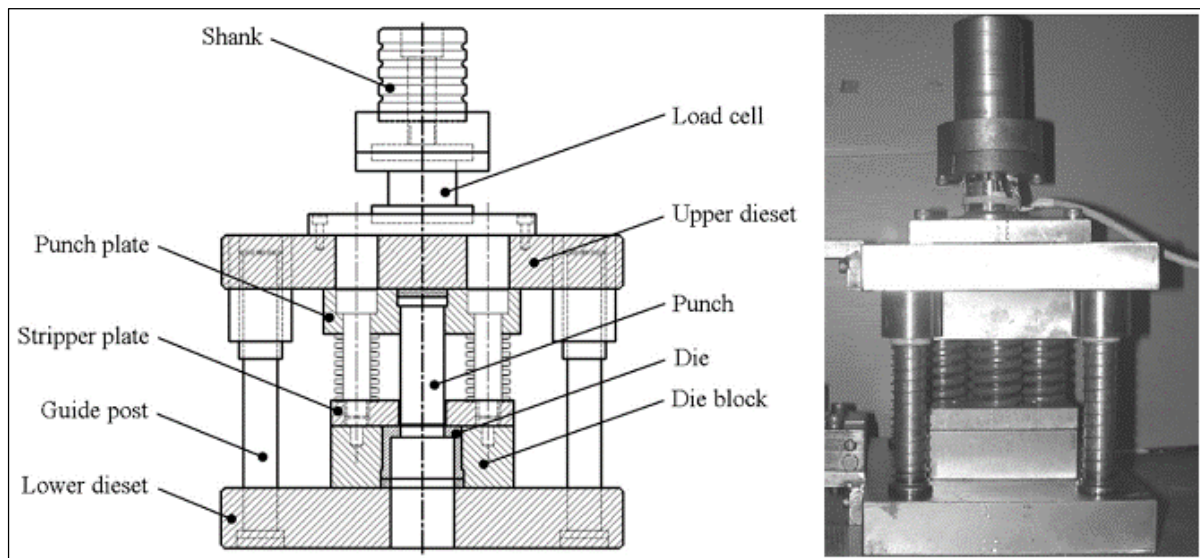
## 2.3 วิธีทดสอบ

**2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)** ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8M และนำไปทดสอบแรงดึงโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ขนาด 50 kN รุ่น AGS-X ยี่ห้อ SHIMADZU ดังรูปที่ 1 เพื่อตรวจสอบสมบัติทางกล ทำการดึงทดสอบด้วยความเร็ว 10 mm/min โดยรายละเอียดผลการทดสอบจะประกอบไปด้วย ค่าความเค้นคราก (Yield stress) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ของวัสดุ



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์

**2.3.2 กระบวนการปั๊มตัดแผ่นเปล่า (Blanking process)** ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดทดสอบโดยการปั๊มตัดขึ้นรูปแผ่นเปล่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. ด้วยแม่พิมพ์ตัด (Blanking die) ดังรูปที่ 2 ซึ่งพินซ์และตายทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 และทำการชุบแข็งให้มีค่าความแข็งที่  $60 \pm 2$  HRC โดยกำหนดให้ขนาดรูตายมีค่าความโตเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นเปล่า (Blank) และกำหนดระยะช่องว่างคมตัด (Cutting clearance) ตามมาตรฐานของการปั๊มตัดโลหะแผ่นประเภทเหล็กกล้าที่ 8% ของค่าความหนาแผ่นชิ้นงาน



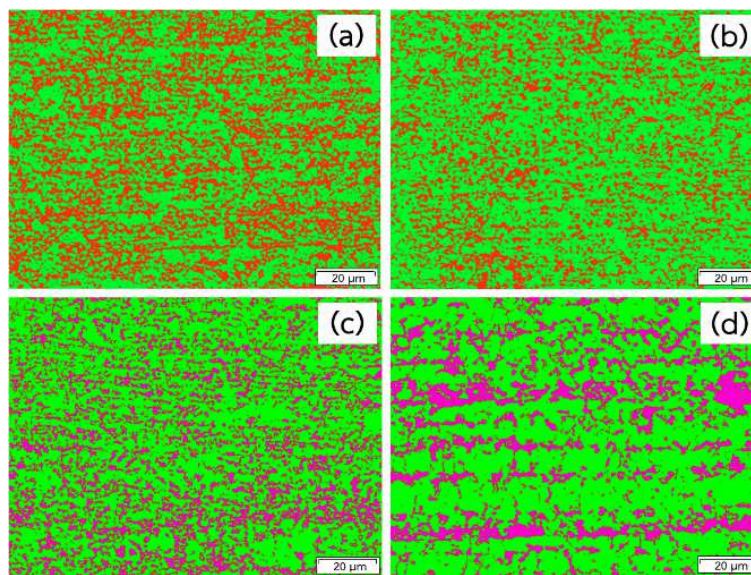
รูปที่ 2 แม่พิมพ์เพื่อทดสอบการปั๊มตัดแผ่นเปล่า

### 3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

โลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนถูกนำไปตรวจสอบผลกระทบด้านต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบแรงดึง (Tensile test) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และการปั๊มตัดแผ่นเปล่า (Blanking) โดยจะทำการประเมินผลและวิเคราะห์ผลการทดลองจากโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และลักษณะความสูง

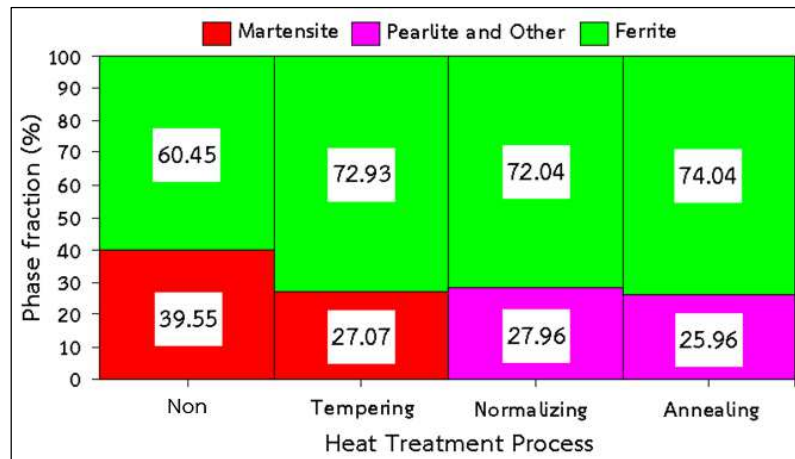
ส่วนต่างๆ บนขอบตัด แสดงผลการทดลองได้ดังนี้

**3.1 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และการวิเคราะห์เฟส (Phase analysis)** การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ดำเนินการโดยนำตัวอย่างไปหล่อในเรซิน ชัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320-1,200 และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาด จากนั้นกัดผิวตัวอย่างด้วยสารละลายกรดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทัศน์แบบแสง (Optical microscope; OM) และวิเคราะห์สัดส่วนเฟสที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม Olympus stream image analysis โดยปกติเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 โครงสร้างจุลภาคปรากฏเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensitic phase) กระจายตัวในเมตริกซ์ของเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix; F) [9] จากรูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งเฟสเฟอร์ไรท์หรือเมตริกซ์พื้นมีลักษณะเป็นสีเขียว เฟสมาร์เทนไซต์แทนด้วยสีแดง ส่วนเฟสเพียไลต์ (Pearlite phase) และอื่นๆ จะแทนด้วยพื้นสีม่วง พบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเฟสมาร์เทนไซต์ละเอียดกระจายทั่วโครงสร้างจุลภาคและมีปริมาณมากแสดงดังรูปที่ 3 (a) ซึ่งโดยปกติสำหรับเหล็ก DP590 การปรากฏเฟสมาร์เทนไซต์ในปริมาณมากส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานแรงดึงสูง [10] รูปที่ 3 (b) ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว พบว่าเฟสมาร์เทนไซต์มีลักษณะละเอียดและมีสัดส่วนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแต่เฟอร์ไรท์มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 3 (c) แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านอบแบบปกติ (Normalizing) เนื่องจากถูกอบที่อุณหภูมิเหนือเส้นขอบเขตบนของอุณหภูมิวิกฤต (Upper-Critical Temperature,  $A_3$  หรือ  $A_{cm}$ ) จึงส่งผลทำให้เฟสมาร์เทนไซต์เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์และเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสเพียไลต์ ซีเมนไตต์คาร์ไบด์ ( $Fe_3C$ ) และเฟสอื่น ๆ หลังจากกระบวนการเย็นตัว [11] ส่วนลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบหลังการอบอ่อน การเย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาส่งผลให้เฟสเฟอร์ไรท์รวมตัวกันเกิดเป็นเฟสที่มีขนาดใหญ่บนเมตริกซ์พื้นดังรูปที่ 3 (d)



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์เฟส (a) ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (b) อบคืนตัว (c) อบปกติ และ (d) อบอ่อน

โดยสัดส่วนของแต่ละเฟสแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะส่งผลให้ปริมาณของเฟสชนิดแข็งเช่น เฟสมาร์เทนไซต์ เฟสเพียไลต์ และเฟสอื่น ๆ ลดลงในทุกกระบวนการ นั่นหมายถึงเมตริกซ์พื้นซึ่งมีความอ่อนเหนียวจะมีสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งกระบวนการการอบอ่อนเพิ่มสัดส่วนเมตริกซ์พื้นได้มากที่สุดทำให้เกิดการยึดตัวของวัสดุได้ดีและมีความแข็งแรงลดลงมากที่สุด

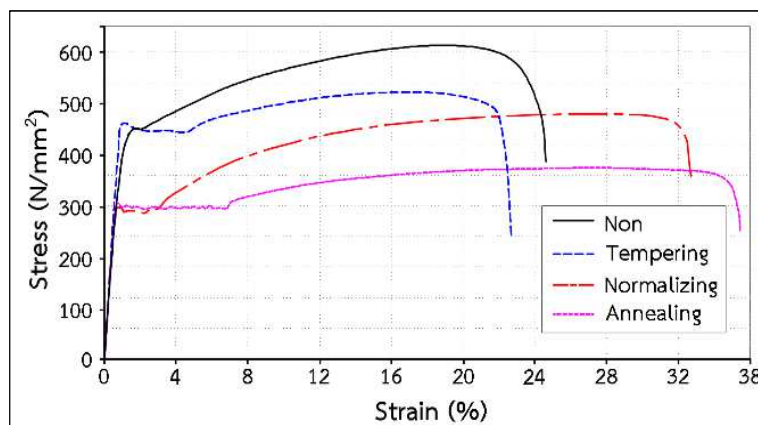


รูปที่ 4 สัดส่วนของเฟส

**3.2 สมบัติทางกล (Mechanical properties)** ภายหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนโลหะแผ่นซึ่งถูกตัดเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8M นำไปทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยผลการทดสอบแรงดึงจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด ผลการทดสอบแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลเฉลี่ยของชิ้นทดสอบจากกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน

Heat treatment process	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Total Elongation (%)
Non	454.48	608.79	24.6
Tempering	462.24	524.26	22.9
Normalizing	290.78	480.80	32.2
Annealing	291.25	365.89	37.2

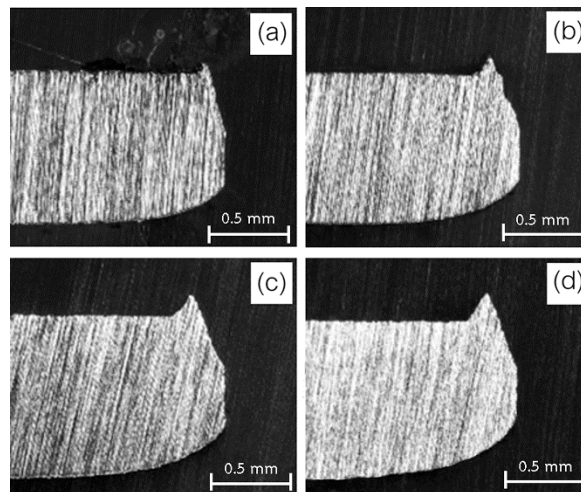


รูปที่ 5 สมบัติทางกลชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึง

จากผลการทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นในทิศทางต่างๆ และนำข้อมูลการทดสอบมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นคราก (Yield stress;YS) พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวจะมีค่าความเค้นครากสูงสุดที่ 462.24 N/mm<sup>2</sup> และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบปกติมีค่าความเค้นครากต่ำที่สุดที่ 290.78 N/mm<sup>2</sup> ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง (Ultimate tensile stress;UTS) พบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีค่า

ความแข็งแรงดึงสูงสุดที่  $571.98 \text{ N/mm}^2$  ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่  $365.89 \text{ N/mm}^2$  และผลการเปรียบเทียบอัตราการยืดตัวโดยรวม (Total elongation; TE) พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนมีอัตราการยืดตัวโดยรวมมากที่สุดที่ 37.2% และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวมีอัตราการยืดตัวโดยรวมน้อยสุดที่ 22.9% ซึ่งให้เห็นว่ากระบวนการทางความร้อนส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของโลหะแผ่นชิ้นทดสอบซึ่งพบว่ากระบวนการอบคืนตัว จะส่งผลให้ค่าความเค้นครากของโลหะแผ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวจะลดลง เนื่องจากเกิดการแตกตัวของเฟสมาร์เทนไซต์ทำให้มีขนาดที่ละเอียดและมีการจัดเรียงตัวของเกรนเกิดขึ้น [12] ส่วนโลหะแผ่นชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบปกติ (Normalizing) ส่งผลให้ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงลดลง ในขณะที่อัตราการยืดตัวจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโลหะแผ่นได้รับความร้อนเหนือเส้นของอุณหภูมิวิกฤต ( $A_3$ ) ทำให้ให้เฟสมาร์เทนไซต์เกิดการสลายตัวเปลี่ยนเป็นเฟสออสเทนไนต์สมบูรณ์ และด้วยการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศนิ่งปกติ ทำให้เกรนมีการจัดเรียงตัวและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้น จากอัตราการเย็นตัวที่มากกว่าเส้นอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง [13] และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลงมากที่สุด ในขณะที่คุณสมบัติด้านอัตราการยืดตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด เนื่องจากการอบอ่อนเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่วัสดุจนอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตและปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตา ซึ่งส่งผลให้เฟสเฟอร์ไรท์เกิดการขยายตัวโตขึ้น ส่งผลทำให้โลหะแผ่นมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง ในขณะเดียวกันสมบัติด้านความเหนียวหรืออัตราการยืดตัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

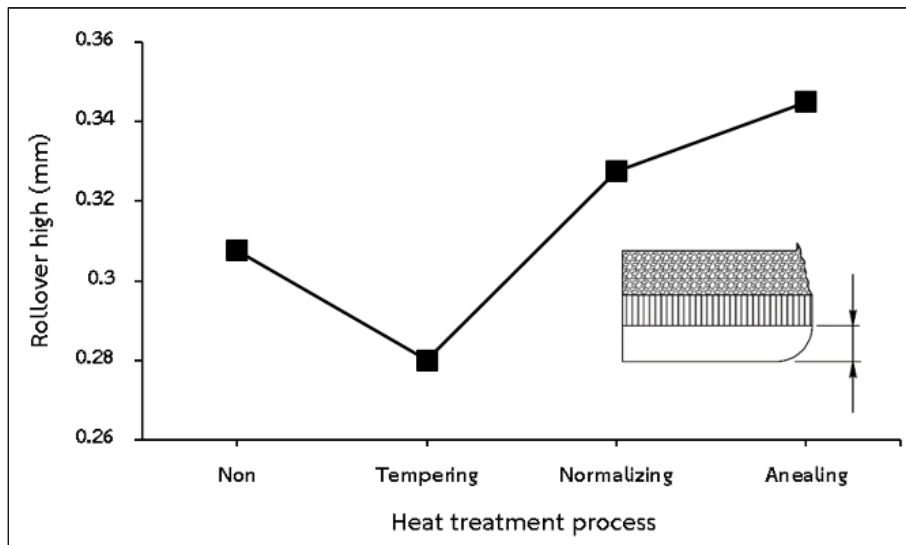
**3. ลักษณะขอบตัด (Cutting edge characteristics)** แผ่นเปล่าที่ได้จากการบีมตัดไปหล่อด้วยเรซินและขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จากนั้นทำการบันทึกภาพในแนวภาคตัดขวางของขอบตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Stereo microscope) ที่กำลังขยาย 20 เท่า ดังรูปที่ 6 เพื่อวัดค่าความสูงของส่วนต่างๆ บนขอบตัดเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบบของกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อความสูงส่วนต่างๆ บนขอบตัด ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7-10 ตามลำดับ



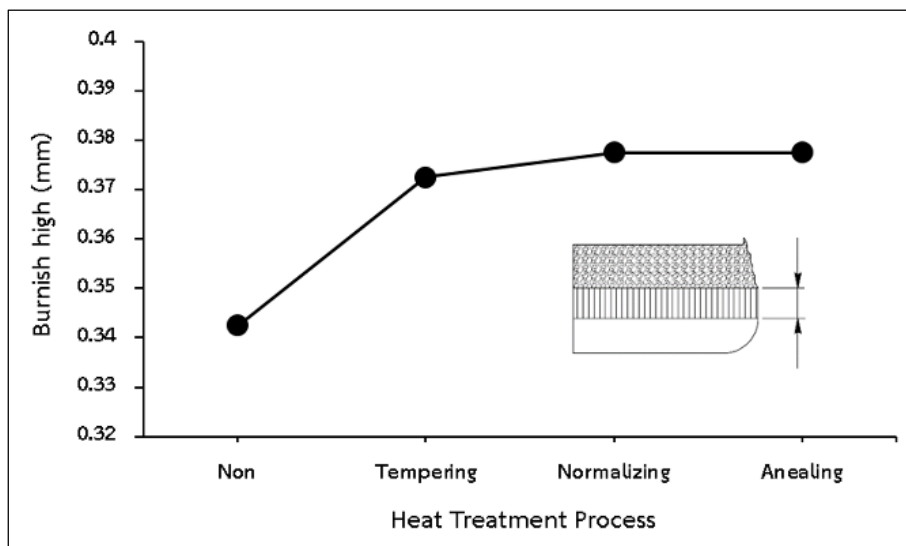
รูปที่ 6 ลักษณะขอบตัด (a) ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (b) อบคืนตัว (c) อบปกติ (d) อบอ่อน

ผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงผลกระทบบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงส่วนโค้งมน (Rollover) บนขอบตัด ซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบแบบปกติจะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนเพิ่มมากขึ้นและชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนจะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนมากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะแปรผกผันกับค่าความเค้นครากของโลหะแผ่น เนื่องจากส่วนโค้งมนเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ [14] วัสดุที่มีค่าความเค้นครากต่ำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรได้ง่าย จึงสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวซึ่งมีค่าความเค้นครากสูงที่สุด ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนน้อยสุด

ในขณะที่ขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนซึ่งมีค่าความเค้นครากต่ำ จะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนมากที่สุด



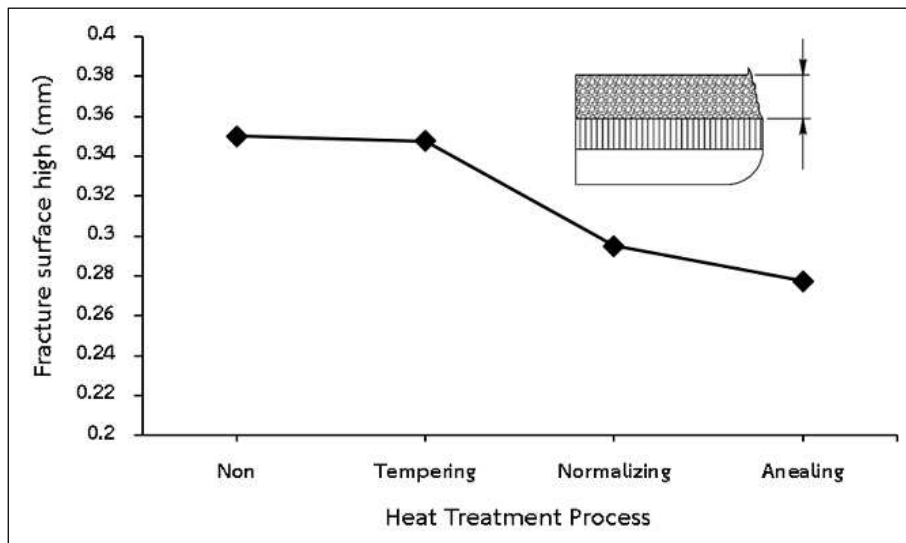
รูปที่ 7 ความสูงส่วนส่วนโค้งมนของขอบตัด



รูปที่ 8 ความสูงส่วนเรียบตรงของขอบตัด

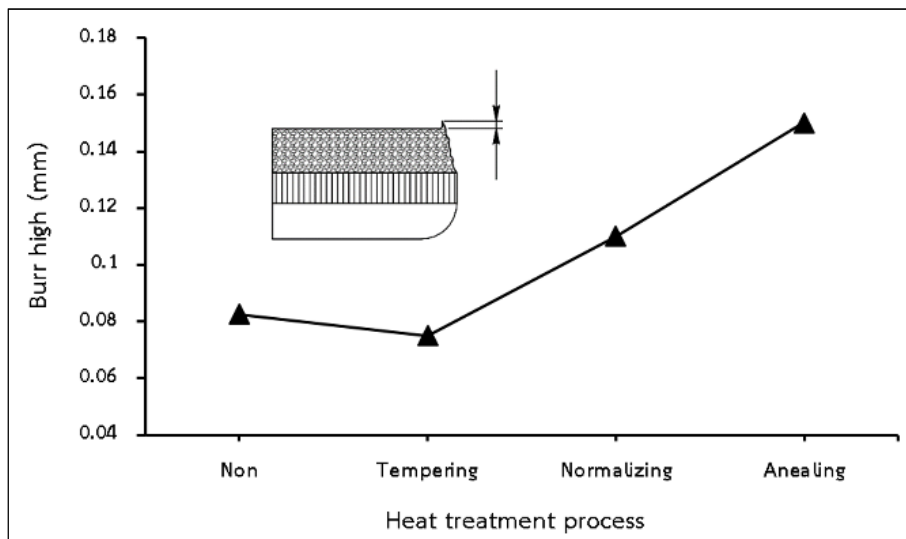
จากรูปที่ 8 แสดงผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงของส่วนเรียบตรง (Burnish) บนขอบตัดซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการมากที่สุดเพราะเป็นตัวบ่งชี้ถึงขนาดและคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ พบว่าขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีค่าความสูงของส่วนเรียบตรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนจะมีค่าความสูงของส่วนเรียบตรงมากที่สุด โดยพบว่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ เนื่องจากส่วนเรียบตรงเป็นผลมาจากการเสียรูปแบบเฉือน (Shear deformation) ภายในเนื้อวัสดุ เกิดขึ้นหลังจากวัสดุได้รับความเค้นเกินค่าความเค้นดึงสูงสุด [15] ดังนั้นวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ การตัดเฉือนจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ขอบตัดมีส่วนเรียบตรงสูง





รูปที่ 9 ความสูงส่วนส่วนรอยแตกของขอบตัด

จากรูปที่ 9 แสดงผลกระทบบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงของส่วนรอยแตก (Fracture surface) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการ พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีค่าความสูงของส่วนรอยแตกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบคืนตัว ค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนจะส่งผลให้ความสูงของส่วนรอยแตกลดลงมากที่สุด ทั้งนี้พบว่าค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวน้อย (เปราะ) มักเกิดรอยแตกหรือเกิดการแตกหักเสียหายได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่วนวัสดุเหนียวจะเกิดการแตกหักเสียหายได้ยากกว่า



รูปที่ 10 ผลการวัดค่าความสูงครีบบ

ผลการทดลองรูปที่ 10 แสดงผลกระทบบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงครีบบ (Burr) บนขอบตัด ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องกำจัดออก พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวมีค่าความสูงครีบบลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การอบแบบปกติส่งผลให้ครีบบมีความสูงเพิ่มมากขึ้นและชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ครีบบจะมีความสูงมากที่สุด โดยค่าความสูงครีบบจะแปรผันตามอัตราการยืดตัวของวัสดุหรือค่าความสูงครีบบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อวัสดุมีอัตราการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น

เนื่องจากวัสดุที่มีความเหนียวมากจะสามารถยืดตัวได้ดี ดังนั้นในระหว่างกระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่อยู่ระหว่างช่องว่างคมตัดจึงฉีกขาดออกจากกันได้ช้า ซึ่งส่งผลให้ชั้นทดสอบมีค่าความสูงของครีบมากกว่าวัสดุที่มีอัตราการยืดตัวน้อย

#### 4. สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อ สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และค่าความสูงของส่วนต่างๆ บนขอบตัด ของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 กระบวนการทางความร้อนจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงลดลงและมีอัตราการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น โดยกระบวนการอบอ่อนจะเป็นกระบวนการที่ส่งผลให้โลหะแผ่นมีค่าความแข็งแรงลดลงมากที่สุดและมีอัตราการยืดตัวสูงสุดเช่นเดียวกัน

4.2 กระบวนการทางความร้อนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนลดการเกิดขึ้นของเฟสมาร์เทนไซต์หรือเฟสชนิดแข็ง พร้อมกับเพิ่มสัดส่วนเมตริกซ์ของเฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามแต่ละกระบวนการทางความร้อนมีปริมาณสัดส่วนของแต่ละเฟสแตกต่างกันเล็กน้อย สำหรับกระบวนการอบอ่อนลดการเกิดขึ้นของเฟสชนิดแข็งและเพิ่มสัดส่วนเมตริกซ์เฟสได้มากที่สุด วัสดุจึงมีการยืดตัวที่ดี ขอบตัดที่ได้จากการบีบอัดมีส่วนเรียบตรงเกิดขึ้นมากและทำให้รอยแตกลดลง

4.3 กระบวนการทางความร้อนจะส่งผลต่อลักษณะขอบตัดของแผ่นเปล่าและสัมพันธ์กับสมบัติทางกล โดยพบว่ากระบวนการอบอ่อนจะส่งผลให้ค่าความสูงของส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรงและความสูงครีบเพิ่มขึ้นมากที่สุด ในขณะที่ส่วนรอยแตกจะลดลงมากที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติทางกลเนื่องจากการอบอ่อนจะส่งผลให้วัสดุมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลงมากที่สุดเช่นเดียวกัน

4.4 จากผลการวิจัยนี้ หากมีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพขอบตัดชิ้นงาน เสนอแนะให้เลือกใช้กระบวนการอบคืนตัว เนื่องจากส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะแผ่นน้อยที่สุด แต่คุณภาพขอบตัดเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับกระบวนการทางความร้อนอื่นๆ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษา ของสาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ, “อิทธิพลของกระบวนการตัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ JSC980Y”, วารสารวิจัย มทรกรุงเทพ., 15 (2): (2564), หน้า 84-94.
- [2] T.T. Huang, R.B. Gou, W.J. Dan n, and W.G. Zhang, “Strain-hardening behaviors of dual phase steels with microstructure features”, Materials Science&Engineering A, Vol.672, (2016), pp. 88–97.
- [3] W. Wang, M. Li, Y. Zhao, and X. Wei, “Study on stretch bendability and shear fracture of 800 MPa dual phase steel sheet” Materials and Design, Vol.56, (2014), pp. 907–913.

- [4] J.C. Zhang, H.S. Di, Y.G. Deng, S.C. Li, and R.D.K. Misra, “Microstructure and mechanical property relationship in an ultrahigh strength 980 MPa grade high-Al low-Si dual phase steel”, *Materials and Design*, Vol.645, (2015), pp. 232–240.
- [5] S.F. Golovashchenko, N. Wang, S. Nasheralahkami, N.A. Reinberg, and W. Zhou, “Mechanism of fracture in sheet metal cutting processes and its effect on sheared edge stretchability”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.418, (2018), 012057. doi:10.1088/1757-899X/418/1/012057.
- [6] D. Bublíková, S. Jenicek, I. Vorel, B. Mašek, “New heat treatment process for advanced high-strength steels”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.179(1), (2017), 012009, doi: 10.1088/1757-899X/179/1/012009
- [7] Z. Zhang, Y. Li, K. Manabe, and F. Zhu, “Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TRIP Seamless Steel Tube”, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 5 (2012), pp. 833 - 837.
- [8] F. Forouzan, N. Strandqvist, E. Vuorinen, E. Navara, and F. Mücklich, “Effect of Tempering on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded and Post-Weld Treated AHSS Specimens”, *Materials Science Forum*, Vol. 891, (2017), pp. 18-24.
- [9] E. Aldalur, A. Suarez, F. Veiga, “Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity” *Journal of Materials Processing Tech.* 297 (2021) 117271.
- [10] P. Libo, C. Lin, and W. Zhou. "Study on mechanical properties and microstructure of DP590 steel with different annealing process." *E3S Web of Conferences*. Vol. 245, (2021). EDP Sciences.
- [11] V.B. da Trindade Filho, A.S. Guimarães and J.da C. Payão Filho, “Normalizing Heat Treatment Effect on Low Alloy Steel Weld Metals”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. XXVI, (2004), No.1, pp.62-66.
- [12] T. Senthilkumar, and T. K. Ajiboye, “Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel”, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 11, No.2, (2012), pp.143-152.
- [13] A.W. Morsy, and A.I.Z. Farahat, “Effect of Cr and Thermomechanical Processing on the Microstructure and Mechanical properties of Advanced High Strength Steel” *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 140(2), (2018), doi:10.1115/1.4038393.
- [14] K. Fuchiwakia, Y. Mureb, K. Yoshidac, and M. Murakawa, “Prediction of die-roll in fine blanking by use of profile parameters”, *Procedia Engineering*, Vol. 207, (2017), pp. 1564–1569.
- [15] E. Kancaa, O. Eyercioğlub, I.H. Karahanc, A. Günend, and K. Göv, “Effects of Blanking Speed on the Shear Surface of Mild Steel (St37)”, *Acta Physica Polonica Series a*, Vol. 130, (2016), pp. 370-374.