

อิทธิพลของกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและ
ความเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ JSC980Y
Effect of 3 Points Bending Process on Microstructure Evolution and Damage
Characteristics of Dual Phase High Strength Steel Sheets JSC980Y

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}, พงศกร หลีตระกูล²

Natthasak Pornputsiri^{1*}, Pongsakorn Leetrakul²

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

^{1,2}Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala
University of Technology Rattanakosin, Thailand

*Corresponding author. Tel.: 08 6667 6802 E-mail: natthasak.por@mutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ JSC980Y ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่พบปัญหาหลักคือมักจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่าย เนื่องจากมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงและขึ้นรูปได้ยากที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงได้กำหนดแนวทางเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบอุ่นที่อุณหภูมิ 200 °C, 400 °C, และ 600 °C เปรียบเทียบกับผลการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง ด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ที่ขนาดมุมแตกต่างกันในช่วง 0-75° โดยใช้พื้นที่มีรัศมี 0.25 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิการดัดขึ้นรูปจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและขนาดมุมตีตัวกลับของโลหะแผ่นอย่างชัดเจน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ขนาดมุมตีตัวกลับเพิ่มมากขึ้นและขนาดของมุมตีตัวกลับจะเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 400 °C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิขึ้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบของรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัดของชิ้นงานสำเร็จ

คำสำคัญ : กระบวนการดัด การขึ้นรูปแบบอุ่น การตีตัวกลับ กลไกความเสียหาย การขึ้นรูปโลหะแผ่น

Abstract:

This study used dual phase high strength steel sheets metal JSC980Y of 1 millimeter size thickness, as a conventional used in the process of forming automotive parts. Cracking and tearing occur due to its high strength property resulting in brittleness at room temperature.

Received 07-09-2021

Revised 11-11-2021

Accepted 15-11-2021

To avoid this phenomenon and increases of formability, bending was carried out by applying the warm temperature treatments at 200 °C, 400 °C and 600 °C, compared with the bending test at room temperature. 3-Point bending processes were performed with different bending angles (0-75°) by a 0.25 millimeter punch tip radius. The experiment results showed that, the bending temperature directly affects the formability and the springback angle of the dual phase sheet metal. When the temperature was increased, springback angle tended to increase and the springback angle maximum occurred at the bending temperature of 400 °C because this temperature range was effect on microstructure changes of dual phase steel. Furthermore, when the bending temperature was increased, it directly affected to microstructure and failure characteristics on the bending surface of the finished product.

Keywords: Bending process Warm forming Spring-back Failure mechanisms Sheet metal forming

1. บทนำ

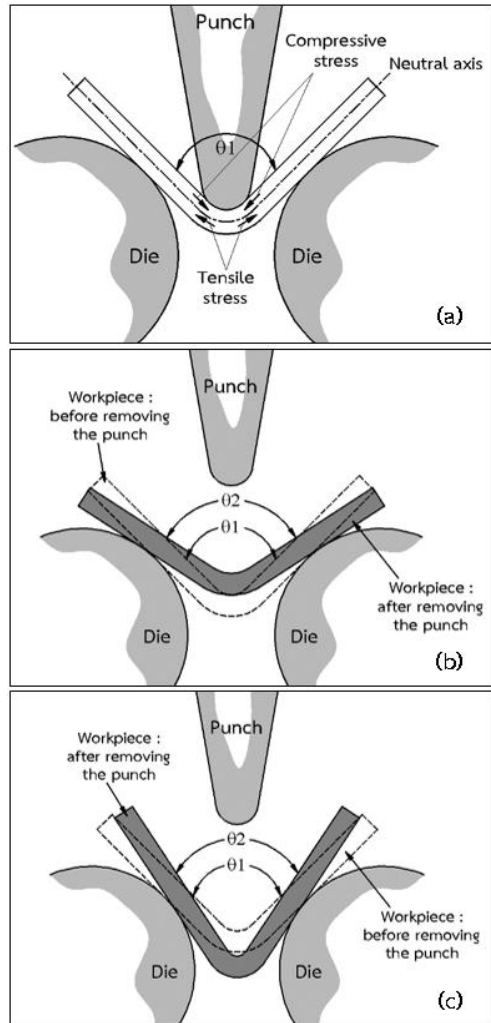
สืบเนื่องจากเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูงเป็นเหล็กกล้าชนิดที่ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์อย่างกว้างขวาง เพราะเป็นเหล็กกล้าที่มีความโดดเด่นด้านความแข็งแรง จึงนิยมนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบของยานยนต์ เช่น ชิ้นส่วนกันชน แซสซี และโครงสร้างประตู เป็นต้น เพื่อวัตถุประสงค์ด้านความปลอดภัย การลดน้ำหนักของรถยนต์ซึ่งช่วยให้ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงและลดมลพิษทางอากาศได้ กล่าวคือโครงสร้างรถยนต์ที่แข็งแรงจะช่วยในการปกป้องผู้ขับขี่หรือผู้โดยสารได้ดีขึ้นและรถยนต์ที่มีมวลหรือน้ำหนักน้อยลงก็จะช่วยลดความรุนแรงจากการชนกระแทกได้มากขึ้น โดยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ (Dual Phase) เป็นชนิดของเหล็กกล้าที่ถูกนำมาใช้เพื่อการผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าชนิดอื่นๆ ในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเนื่องจากมีความโดดเด่นด้านความแข็งแรงสูงและสามารถดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกได้ดี โดยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่จะมีโครงสร้าง

จุลภาคซึ่งประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) กระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (Ferrite matrix) ซึ่งปริมาณและความหนาแน่นของเฟสมาร์เทนไซต์จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรง (Strength) ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) และความเครียดแข็ง (Strain hardening) ของเหล็กกล้าชนิดนี้ ปัญหาสำคัญในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูง คือ การแตกร้าวเสียหายและการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่ได้ดำเนินการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปจากลักษณะและผลที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวภายนอกของชิ้นทดสอบ แต่การแตกร้าวเสียหายของโลหะแผ่นจากการขึ้นรูปโดยการพับหรือดัดขึ้นรูปที่รุนแรง จะเกิดขึ้นทั้งบนพื้นผิวภายนอกและภายในเนื้อของวัสดุ โดยเฉพาะความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสังเกตไม่พบที่พื้นผิวภายนอกซึ่งเป็นอันตรายอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้งาน

พฤติกรรมการคืนตัวกลับเป็นปัญหาสำคัญ
ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งอยู่ในรูปของ
การเกิดสปริงแบ็ค (Spring-back) หรือสปริงโก
(Spring-go) การคืนรูปในลักษณะของการเกิดสปริง
แบ็คหมายถึง ขนาดของมุมขึ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นหลัง
การตัดดัดภาพที่ 1(b) ในขณะที่การเกิดสปริงโก
หมายถึง หลังการตัดขึ้นงานจะมีขนาดมุมลดลงดัง
ภาพที่ 1(c) ซึ่งพฤติกรรมการเกิดสปริงแบ็คและการ
เกิดสปริงโกจะส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์
และกระบวนการผลิตต่อเนื่องในอุตสาหกรรม
ผลิต ผู้ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์จึงได้พยายามค้นหา
วิธีการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อแก้ปัญหาการคืนตัวของ
แผ่นขึ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยวิธีการคำนวณหรือโดย
การทดลอง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเวลาและส่งผลให้
ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น การออกแบบแม่พิมพ์ให้มี
ขนาดมุมหรือระยะการกดตัดที่มากกว่าหรือน้อยกว่า
ขนาดมุมขึ้นงานสำเร็จ จึงเป็นแนวทางในการชดเชย
พฤติกรรมการคืนรูปของวัสดุ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่มี
ผลดีที่สุด สามารถลดการสิ้นเปลืองด้านเวลาและวัสดุ
จากการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

การตัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่สำคัญใน
อุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากการขึ้นรูปโลหะแผ่น
จะมีส่วนของกระบวนการตัดขึ้นรูปร่วมด้วยเสมอ
ทั้งนี้ความถูกต้องเที่ยงตรงของผลิตภัณฑ์หรือขนาด
ขึ้นงานสำเร็จจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการ
ออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดเงื่อนไขใน
กระบวนการตัดขึ้นรูปที่เหมาะสม [2] ทั้งนี้การตัดขึ้น
รูปด้วยวิธีการตัดแบบ 3 จุด (3-point bending)
เป็นวิธีการที่ง่ายและประหยัด เนื่องจากสามารถขึ้น
รูปขึ้นงานได้ขนาดมุมที่หลากหลายบนแม่พิมพ์เพียง
ชุดเดียวโดยการกำหนดระยะการกดของพินซ์ และ
เป็นวิธีการที่ได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทาน

ระหว่างผิวชิ้นงานและผิวของตายขณะขึ้นรูป
น้อยมาก [3]



ภาพที่ 1 ลักษณะการตัดและการคืนรูปของวัสดุ
(a) ขณะกดตัดขึ้นรูป (b) การเกิดสปริงแบ็ค $\theta_2 > \theta_1$
(c) การเกิดสปริงโก $\theta_2 < \theta_1$ [1]

ที่ผ่านมามีนักวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษา
เกี่ยวกับเงื่อนไขและข้อกำหนดของกระบวนการตัด
ขึ้นรูปแบบ 3 จุดไว้อย่างหลากหลายเช่น การศึกษา
ถึงผลกระทบของความหนาแผ่นโลหะ ผลกระทบจาก

ทิศทางการรีดของวัสดุ สมบัติทางกลของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานและรัศมีพื้นซ์ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโกของชิ้นงานสำเร็จ [4] และมีการวิจัยเพื่อตรวจสอบผลกระทบจากการออกแบบแม่พิมพ์ เช่น ลักษณะภาพร่างของพื้นซ์ รัศมีพื้นซ์ รัศมีคาย และลักษณะของแผ่นกดยึดชิ้นงานที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการติดตัวกลับของโลหะแผ่น เป็นต้น [5] นักวิจัยบางส่วนได้ใช้เทคนิคการตัดโค้งเพื่อศึกษาขนาดการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโก โดยใช้เทคนิคการตัดขึ้นรูปนูน ซึ่งมักจะถูกใช้ในกระบวนการตัดขึ้นรูปตัววีในขจัดการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโก เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีขนาดมุมที่ถูกต้องและเที่ยงตรง และแสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโกคือขนาดความกว้างและความสูงที่ส่วนปลายของพื้นซ์เพื่อการกดนูนต่ำ (Coined-bead) บนแผ่นโลหะ [6, 7] นอกจากนี้ยังพบว่ามีการศึกษาซึ่งได้ทำการศึกษเกี่ยวกับกลไกการแตกหักและการแตกร้าเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ถูกตัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัดรูปตัว V ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นชนิดดังกล่าว [8] ได้มีการศึกษาวิจัยผลกระทบของอุณหภูมิการขึ้นรูปและขนาดของเกรนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อนแบบต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของโลหะแผ่นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 20 ถึง 300 °C [9] และมีนักวิจัยที่ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมกรรมการติดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในช่วงอุณหภูมิอุ่นและร้อน ซึ่งพบว่ามุมขนาดมุมติดตัวกลับจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อ

อุณหภูมิบริเวณมุมติดตัวกลับเพิ่มขึ้นสูงกว่า 750K ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของเฟสออสเทนไนต์ [10]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการตัด เพื่อการเพิ่มความสามารถในการตัดขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y โดยใช้กระบวนการตัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ด้วยการเปรียบเทียบผลการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิและขนาดมุมการตัดที่แตกต่างกัน เนื่องจากโดยทั่วไปการตัดขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ที่อุณหภูมิห้องมักจะเกิดการแตกร้าเสียหายได้ง่ายจากสมบัติด้านความแข็งแรงและพฤติกรรมความเครียดแข็งแรงสูง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาทดลองการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าเสียหายและเพิ่มความสามารถในการตัดขึ้นรูปของเหล็กกล้าชนิดดังกล่าว

2. วัสดุและการออกแบบการทดลอง

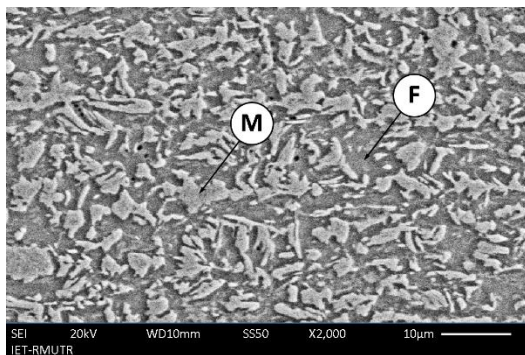
2.1 วัสดุการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากับโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร โดยตัดเตรียมชิ้นทดสอบในทิศทางขวางแนวการรีดด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่นพาวเวอร์ชีयरและตกแต่งเพื่อลบรอยครีบจากการตัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ขนาดความกว้าง 12.5 มิลลิเมตร x ขนาดความยาว 30 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น ต่อเงื่อนไขการทดสอบ โดยสมมติฐานการทดสอบได้กำหนดค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลที่ 95% และมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลไม่เกิน 5% จากผลการสุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบสมมติฐานงานวิจัยโดยการทดสอบทางสถิติ (T-test) จากการกำหนดจำนวนครั้งการทดสอบที่จำนวน 10 ตัวอย่างต่อเงื่อนไข

การทดลองพบว่าได้ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า α (0.05) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดมุมติดตัวกลับของแต่ละขนาดมุมการตัดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโลหะแผ่นจะดำเนินการโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (Elemental analyzer) ซึ่งผลการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 1 ส่วนลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะแผ่นก่อนการตัดขึ้นรูป จะดำเนินการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยา ดังภาพที่ 2 ซึ่งพบว่าโครงสร้างหลักของเหล็กกล้าชนิดนี้จะประกอบไปด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ (M) ซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาว เกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (F) ที่ปรากฏเป็นสีเทา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y

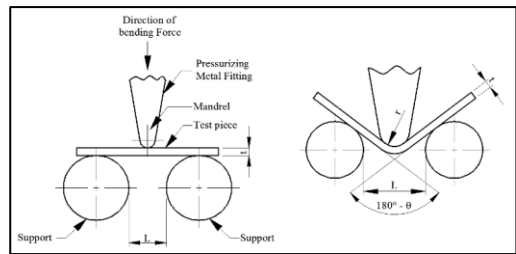
C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)
0.1766	1.823	1.4262	0.0190	0.0306



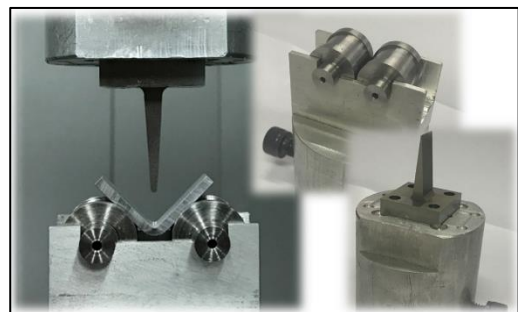
ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้ากล้าชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y ที่อุณหภูมิห้อง

2.2 เครื่องมือและมาตรฐานการทดสอบ

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบการดัดแบบ 3 จุดตามมาตรฐาน ISO7438 : 2010 [11] ซึ่งใช้สำหรับทดสอบผลิตภัณฑ์ประเภทโลหะแผ่น โดยรายละเอียดจะแสดงดังภาพที่ 3 ส่วน ซึ่งจะกำหนดระยะห่างระหว่างผิวทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบ (L) $L = 2r + 3t$ โดยที่ r คือรัศมีการตัดโค้งหรือรัศมีส่วนปลายของพันธ์ และ t คือ ขนาดความหนาของชิ้นทดสอบ ซึ่งกำหนดขนาดทรงกระบอกรองรับให้มีขนาดรัศมี (R) 10 มิลลิเมตร และใช้พันธ์ที่มีขนาดรัศมี (r) 0.25 มิลลิเมตร ให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางความยาวของชิ้นทดสอบ



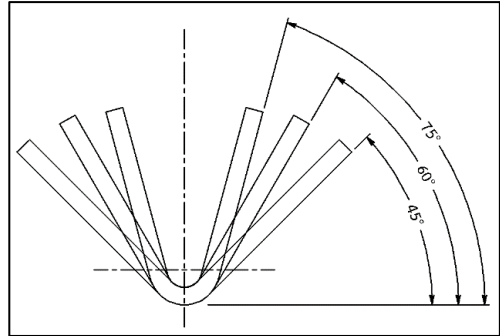
ภาพที่ 3 ภาพแบบการทดสอบการดัดแบบ 3 จุดตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 [11]



ภาพที่ 4 เครื่องมือทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด

2.3 ข้อกำหนดการทดลอง

ทำการทดสอบโดยใช้ชุดแม่พิมพ์สำหรับทดสอบการติดตามข้อกำหนดของวัตถุประสงค์ขอบเขตการวิจัย และมาตรฐานการทดสอบ ดังภาพที่ 4 โดยจะติดตั้งชุดแม่พิมพ์บนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ รุ่น Zwick / Z020 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการติดตัวกลับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยจะดำเนินการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ระดับ คืออุณหภูมิห้อง 200°C 400°C และ 600°C โดยขึ้นทดสอบจะถูกอบให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้าและใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ Proportional integral derivative (PID) ซึ่งจะทำให้การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งใกล้เคียงกับขึ้นทดสอบมากที่สุดเพื่อความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ โดยทำการอบที่อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดประมาณ 20 °C เพื่อชดเชยการสูญเสียความร้อนขณะนำขึ้นทดสอบไปทำการดัดขึ้นรูป กำหนดความเร็วในการกดดัดที่ 120 มิลลิเมตร/นาที โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ทำการบันทึกผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลและประเมินความสามารถในการดัดขึ้นรูปรวมทั้งตรวจสอบวิวัฒนาการความเสียหายของขึ้นทดสอบที่มุมการดัด 45° 60° และ 75° ตามลำดับ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขนาดช่วงของมุมในการทดสอบการดัด

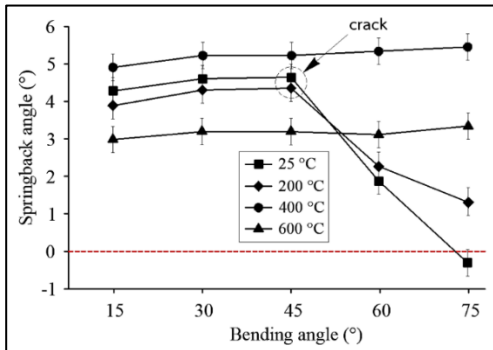
2.4 การบันทึกผลการทดลอง

ขึ้นทดสอบที่ได้จากดัดขึ้นรูปด้วยขนาดมุมที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 5) จำนวน 10 ชิ้น โดยขึ้นทดสอบ จะถูกนำไปถ่ายภาพด้านหน้าเพื่อวัดขนาดมุมด้วยเครื่องโปรไฟล์โปรเจกเตอร์ (Profile projector) โดยการลากเส้นอ้างอิงที่ขอบขึ้นทดสอบเพื่อวัดขนาดมุมและเปรียบเทียบขนาดมุมติดตัวกลับ ซึ่งผลการวัดขนาดมุมติดตัวกลับจะแสดงดังกราฟในภาพที่ 6 จากนั้นจะนำขึ้นทดสอบไปตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการดัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical microscope, OM) ดังภาพที่ 7 จากนั้นจะนำขึ้นทดสอบไปหล่อด้วยเรซิน ชัดผิวเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 – 1,200 และ ผงลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความเสียหายบริเวณมุมการดัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light optical microscope, LOM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อขนาดมุมตีดตัวกลับ

การตีดตัวกลับเป็นปัญหาสำคัญที่พบบ่อยที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน



ภาพที่ 6 ขนาดมุมตีดตัวกลับที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

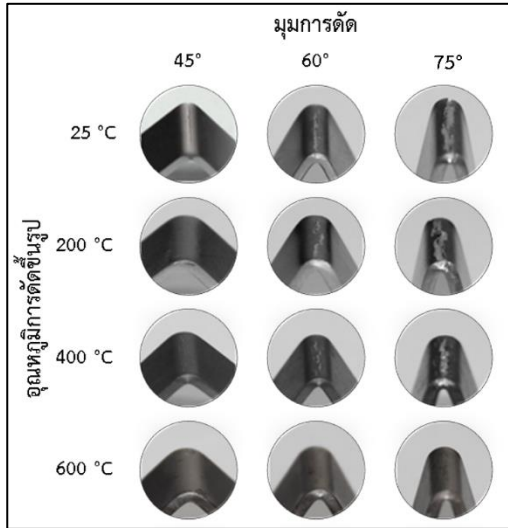
จากผลการทดลองในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) และ 200 °C มีขนาดของมุมตีดตัวกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงของมุมดัดขึ้นรูปตั้งแต่ 15°-45° คือการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องด้วยมุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.324° และที่มุมการดัด 45° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.578° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงกว่า 45° โดยที่มุมการดัด 60° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 1.892° ส่วนผลการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยมุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 3.907° และที่มุมการดัด 45° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.340° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็วที่มุมการดัด 60° ซึ่งมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 2.165° ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัด ส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ

การดัด 400 °C จะพบว่าขนาดมุมตีดตัวกลับเกิดขึ้นสูงสุดเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนรูปของเฟสเบนไนต์ [12] ซึ่งพบว่าที่มุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.950° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นโดยที่มุมการดัด 75° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 5.679° ส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่ามีขนาดของมุมตีดตัวกลับน้อยที่สุด โดยที่มุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 3.057° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นโดยที่มุมการดัด 75° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 3.274°

3.2 ลักษณะและความเสียหายบนพื้นผิวการดัด

ภายหลังจากการทดสอบการดัดจะนำชิ้นทดสอบไปทำการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวการดัดเนื่องจากพื้นผิวส่วนนี้เป็นส่วนที่ได้รับ ความเค้นแรงดึงสูงสุดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) โดยลักษณะของพื้นผิวชิ้นทดสอบจากการดัดขึ้นรูปด้วยมุมดัด 75° แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) จะปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัดอย่างชัดเจนที่มุมการดัด 45° ซึ่งรอยแตกจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตลอดความกว้างของชิ้นทดสอบและรอยแตกดังกล่าวจะขยายตัวกว้างขึ้นเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น จนถึงมุมการดัด 75° รอยแตกร้าวจะขยายกว้างและฉีกขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200 °C รอยแตกร้าวจะเริ่มปรากฏที่มุมการดัด 60° ส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 400 °C รอยแตกร้าวจะเริ่มปรากฏให้เห็นที่มุมการดัด 45° โดยลักษณะของรอยแตกจะเกิดขึ้นเป็นหลายแนวเส้นซึ่งแตกต่างจากการดัดขึ้น

รูปที่ระดับอุณหภูมิอื่น ๆ ส่วนการตัดชิ้นรูปที่อุณหภูมิ 600 °C จะไม่ปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวขึ้น ทดสอบแต่อย่างใด



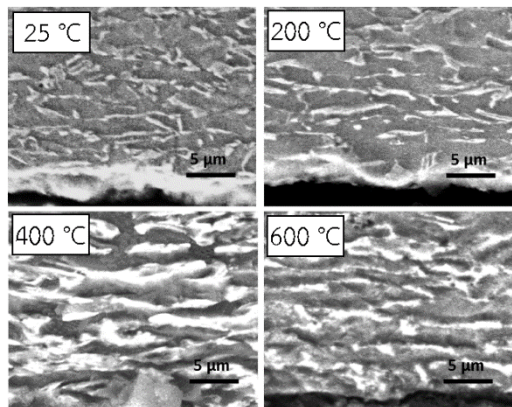
ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นผิวขึ้นทดสอบจากการตัดที่ อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่ามี ความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Davidkov [13] และ Tsoupi [14] ซึ่งอธิบายได้ว่ารอยแตกร้าวที่ เกิดขึ้นบนพื้นผิวการตัดเป็นผลมาจากความเค้นดึงที่ เพิ่มสูงขึ้นขณะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร จึงส่งผลทำให้ สมบัติความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุลดลง อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณส่วน โค้งนอกสุดของมุมการตัด เนื่องจากเป็นส่วนที่ความ เค้นดึงเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อขนาดมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจะ ส่งผลต่อค่าความเค้นดึงมากขึ้น ทำให้ร่องลึกบน พื้นผิวขยายตัวเกิดเป็นรอยแตกร้าวที่ชัดเจนมากขึ้น ส่วนผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความเสียหาย ของชิ้นทดสอบ จะพบว่าความเสียหายของพื้นผิวจะมี แนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก

การเปลี่ยนแปลงของลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 400 °C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัสดุเปลี่ยนโครงสร้างเป็น เฟสเบนไนต์เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุมีสมบัติ เปราะในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม สูงขึ้นเป็น 600 °C โครงสร้างจุลภาคของวัสดุจะมี ปริมาณของเฟสออสเทนไนต์เพิ่มมากขึ้นขณะที่เฟส มาร์เทนไซต์มีปริมาณลดลง จึงส่งผลให้วัสดุมี ความสามารถในการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้น

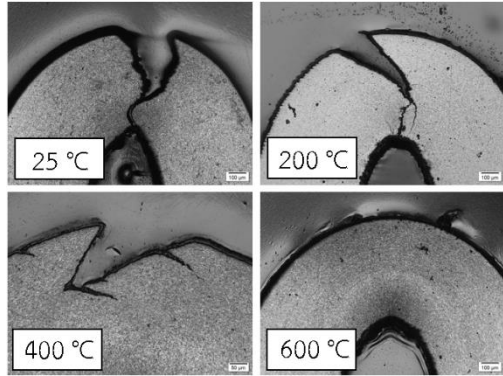
3.3 ลักษณะและความเสียหายของ โครงสร้างจุลภาค

ชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดชิ้นรูปจะถูก นำไปหล่อด้วยเรซิน ชัดผิวเรียบด้วยกระดาษทราย และผงอลูมินารวมทั้งกัดผิวด้วยกรดเคมี จากนั้นจะ นำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้อง จุลทรรศน์แบบแสง (OLYMPUS, BX 60 M) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) โดย ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการตัดชิ้นรูปจะแสดง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาคหลังการตัดชิ้นรูปของ เหล็กกล้า JSC980Y ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากภาพที่ 8 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบจากการตัดขึ้นรูปด้วยขนาดมุม 75° ที่อุณหภูมิห้อง 200 °C 400 °C และ 600 °C ตามลำดับ ผลการตรวจจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคในตำแหน่งของบริเวณมุมการตัดบริเวณที่อยู่ใกล้พื้นผิวด้านนอกของมุมการตัด ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความเค้นดึง (Tensile stress) สูงสุด จะพบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบให้ความร้อน (25 °C) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยไปด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ (สีขาว) เกิดกระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (สีเทา) ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 200 °C จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำและใช้เวลาในการอบให้ความร้อนค่อนข้างสั้น เมื่ออุณหภูมิการอบให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 400 °C จะพบการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจนขึ้น เนื่องจากเกิดการแพร่ของธาตุคาร์บอนจากเฟสมาร์เทนไซต์เกิดเป็นเฟสเบนไนต์ (Bainite) และคาร์ไบด์ขนาดเล็กหรือซีเมนไท์ (Fe_3C) กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ ($\alpha-Fe$) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600 °C จะพบว่าในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์จะมีปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์และปริมาณคาร์ไบด์ลดลง ซึ่งผลการตรวจจสอบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับแผนภาพ TTT ของวัสดุ และงานวิจัยของ Sirinakorn และคณะ [15] และ Anazadeh และคณะ [16]



ภาพที่ 9 ลักษณะความเสียหายในแนวภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบที่มุมตัด 75° ภายใต้อุณหภูมิต่างกัน

นอกจากนั้นผลการตรวจสอบพื้นผิวภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบบริเวณมุมการตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงดังภาพที่ 9 จะพบว่าการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องและการอบให้ความร้อนที่ 200 °C จะพบรอยแตกกว้างขนาดใหญ่และมีความเสียหายที่รุนแรงบนพื้นผิวภายนอกของมุมตัด โดยชิ้นทดสอบจะขาดจากกันเป็น 2 ส่วนหลังการตัดขึ้นรูปด้วยมุมตัด 75° ส่วนชิ้นทดสอบที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C พบความรุนแรงของการแตกร้าวลดลงและรอยแตกกว้างจะเกิดขึ้นเป็นหลายแนวเส้น และชิ้นทดสอบที่ทำการอบให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 600 °C จะไม่ปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวของภาคตัดขึ้นรูปทดสอบแต่อย่างใด

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและขนาดมุมการดัดขึ้นรูปที่ส่งผลต่อขนาดมุมดัดตัวกลับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและลักษณะความเสียหายของชิ้นงานสำเร็จหลังการดัดขึ้นรูปสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิการขึ้นรูปและขนาดมุมการดัด จะส่งผลโดยตรงต่อความเที่ยงตรงของขนาด ชิ้นงาน สำเร็จ ใน รูป ของ ขนาด มุม ดัดตัวกลับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความเสียหายของชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งพบว่าขนาดมุมดัดตัวกลับจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 400 °C จะมีขนาดมุมดัดตัวกลับสูงที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกิดการเปลี่ยนรูปของเฟสเบนไนต์ และความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่า 400 °C เนื่องจากปริมาณเฟสมาเทนไซต์ที่ลดน้อยลงซึ่งส่งผลทำให้วัสดุมีความสามารถในการยึดตัวหรือมีความเหนียวเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างจุลภาค ความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวการดัดของชิ้นทดสอบ และความเสียหายภายในโครงสร้างจุลภาคบริเวณมุมการดัด ซึ่งพบว่ารอยแตกร้าวหรือความเสียหายจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อทำการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ โดยรอยแตกจะเริ่มก่อตัวบนขอบผิวด้านนอกซึ่งเป็นส่วนที่เกิดความเค้นดึงสูงสุด และขยายตัวเข้าสู่กึ่งกลางความหนา ชิ้นทดสอบเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น

ดังนั้นในการประยุกต์ใช้วิธีการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ที่อุณหภูมิแบบอ่อนเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเสียหายและลดพฤติกรรมการดัดตัวกลับของชิ้นงานสำเร็จ จึงควรขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C แต่ไม่ควรให้สูงกว่าอุณหภูมิ

การเกิดผลึกใหม่ของวัสดุเพราะจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานสำเร็จ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย จนงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ozdemir M, Gökmeşe H, Dilipak H, et al. Investigation as experimental and micro-structural of the effect to spring back/forward amount of 16Mo3 (1.5415) sheet materials of different heat-treatments. ISITES, E-Publishing, 2014; 148-55.
- [2] Imai K, Koyama J, Jin Y. High-accuracy V-bending system by real time identifying material property. J Mater Process Tech, 2008;201(1-3):193-7.
- [3] Tekaslan Ö, Şeker U, Özdemir A. Determining spring back amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies. Material and Design, 2006; 27(3):251-8.
- [4] Ragai L, Lazim D, Nemes A. Anisotropy and spring-back in draw-bending of stainless steel 410: experimental and

- numerical study. *J Mater Process Tech*, 2005;166(1):116-7.
- [5] Sousa L, Castro C, Antonio C. Optimal design of V and U bending processes using genetic algorithms. *J Mater Process Tech*, 2006;172(1):35-41.
- [6] Phanitwong W, Thipprakmas S. Determination of Coined-Bead Geometry in the V-Bending Process. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014;63:45-52.
- [7] Thipprakmas S. Finite Element Analysis on the Coined-Bead Mechanism during the V Bending Process. *Material and Design*. 2011;32(10):4909-17.
- [8] Gökmeşe H, Özdemir M. The Effect of Heat Treatment on the Formability Behavior of Hardox-500 Sheet Material. *GU J Sci, Part: C*. 2016;4(4):343-9.
- [9] Luo L, Li W, Wang L, et al. Tensile behaviors and deformation mechanism of a medium Mn-TRIP steel at different temperatures. *Mater Sci Eng*. 2017; 682: 698–703.
- [10] Yanagimoto J, Oyamada K, Nakagawa T. Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings. *CIRP Ann*. 2005;54(1): 213–6.
- [11] ASM International. *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM Handbook., Vol. 8. Ohio, USA, 2000.
- [12] Zhu M, Xu G, Zhou M, et al. Effects of tempering on the microstructure and properties of a high-strength bainite rail steel with good toughness, *Metals (Basel)*. 2018;8(7):484.
- [13] Davidkov A, Jain M K, Petrov R H, et al. Strain localization and damage development during bending of Al-Mg alloy sheets, *Mater Sci Eng*. 2012;(550):395–407.
- [14] Tsoupis I, Hildering S, Merklein M. Prediction of damage in small curvature bending processes of high strength steels using continuum damage mechanics model in 3D simulation, *Prod Eng*. 2013;7(2–3):239–49.
- [15] Sirinakorn T, Uthaisangasuk V. Effects of The Tempering Temperature on Mechanical Properties, *J Met Mater Miner*. 2014;24(1):13–20.
- [16] Anazadeh A S, Kheirandish S. Affect of the tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of dual phase steels. *Mater Sci Eng* .2011;532-41.