



อิทธิพลของศูนย์รวมความเค้นและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติ ทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง Influence of Stress Concentration and Temperature on Mechanical Properties and Microstructure of High Strength Steels

เฉลิมพล คล้ายนิล* และพงศกร หลีตระกูล

Chalermpol Klayni* and Pongsakorn Leetrakul

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110

Department of Production Engineering Technology, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus, Huahin, Prachuapkhirikhan, 77110

*E-mail: chalermpol1@hotmail.com, chalermpol.kla@rmutr.ac.th

Telephone Number: 086-783-6060

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของศูนย์รวมความเค้นกับอุณหภูมิในการทดสอบแรงดึงที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JIS G3135 เกรด SPFC440 ขึ้นตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 ผ่านการเตรียมให้มีศูนย์รวมความเค้นที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ และอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 25°C 200°C 400°C และ 600°C ผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของศูนย์รวมความเค้นส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุโดยมีแนวโน้มลดลงทุกรูปแบบอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดสอบที่อุณหภูมิปกติเป็นการแตกแบบเหนียว เพราะผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควิเวณพื้นผิวตรงรอยแตกมีลักษณะเป็นร่องหลุม เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อน

คำสำคัญ: เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, ศูนย์รวมความเค้น, สมบัติทางกล, โครงสร้างจุลภาค

ABSTRACT

This research aimed to study the influence of stress concentration and temperature under tensile testing on mechanical properties and microstructure of JIS G3135 SPFC440 high strength steels. Tensile specimens, ASTM-E8 standard, were prepared into five different stress concentration patterns and the four different tensile tests temperature were 25°C, 200°C, 400°C, and 600°C. The results showed that the effect of stress concentration on the tensile strength of the material was significantly decreased. From testing at room temperature as a ductile fracture is a result of the microstructure investigation of fracture surface caused the dimples fracture comparing to the testing in high-temperature which loss ductility from heat.

Keywords: High strength steel, Stress concentration, Mechanical properties, Microstructure

1. บทนำ

ปัจจุบันเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel: HSS) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และโครงสร้างของรถยนต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุมีค่าอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ความสามารถในการดูดซับพลังงาน ลดการยุบตัวจากแรงกระแทกที่เกิดจากการชน [1, 2] ทั้งนี้เมื่อชิ้นส่วนผ่านกระบวนการผลิตด้วยการตัดเจาะรู [3] หรือผ่านการขึ้นรูปขยายรู (Hole flanging) ทั้งที่มีการให้ความร้อนและไม่มีความร้อน จะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน กระบวนการตัดเจาะรูส่งผลทำให้เกิดศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) [4] อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมักจะเกิดปัญหาการแตกหรือลิกขาบริเวณขอบรูหรือกระบวนการขึ้นรูปไม่ได้ตามที่ต้องการ

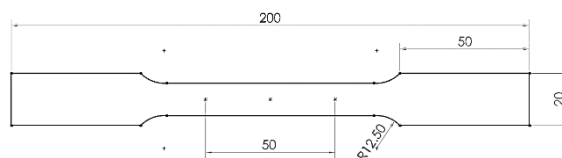
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) กับอุณหภูมิในการทดสอบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และรูปแบบความเสียหายที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อประยุกต์ไปใช้ในการออกแบบกระบวนการผลิต และการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ สำหรับเป็นข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสม วัสดุทดลองคือแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JIS G3135 เกรด SPFC440 ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยขึ้นตัวอย่างผ่านการเตรียมให้มีศูนย์รวมความเค้นที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ ได้แก่ ขึ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านเจาะรู ขึ้นตัวอย่างเจาะรูเดี่ยวตรงศูนย์ ขึ้นตัวอย่างเจาะรูเดี่ยวเฉียงศูนย์ ขึ้นตัวอย่างเจาะรูคู่ตรงศูนย์ และขึ้นตัวอย่างเจาะรูคู่เฉียงศูนย์ มีการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะคือ 1.2 มิลลิเมตร และอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นกับอุณหภูมิในการทดสอบ มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

2.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1.1 งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับวัสดุแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง มาตรฐาน JIS G3135 เกรด SPFC440 ความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นการทดสอบแรงดึงเพื่อศึกษาสมบัติทางกลด้านต่างๆ การเตรียมชิ้นตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ตามมาตรฐาน ASTM-E8 ความยาวรวม (L) = 200 มิลลิเมตร ความยาวพิคัด (L₀) = 50 มิลลิเมตร ความกว้าง (W) = 12.5 มิลลิเมตร และรัศมีของบ่า (R) = 12.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 ด้วยความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อวินาที (Constant crosshead speed) ผลที่ต้องการจากการทดสอบนี้คือค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength: UTS) ความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength: YS) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) ซึ่งแสดงผลจาก Stress-Strain Curve และทำการทดสอบความแข็งแรงระดับจุลภาค (Micro hardness test) บริเวณพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง จำนวน 3 จุดต่อชิ้น เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ Wilson hardness รุ่น Tukon 1102 Test scale HV0.5 Test force 500 gf กดเข้าใช้เวลา 10 วินาที



รูปที่ 1 ชิ้นตัวอย่างทดสอบแรงดึง (หน่วย: mm)

2.1.2 การศึกษาผลกระทบของศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) ด้วยการเตรียมชิ้นตัวอย่างที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะคือ 1.2 มิลลิเมตร

2.1.3 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C ที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และรูปแบบความเสียหาย ด้วยเตาไฟฟ้าอบโลหะรุ่น LH-18 EF-V-P และการตรวจสอบอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างในเตาด้วย Thermocouple ชนิด K เริ่มให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิทดสอบด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ 20°C/min เมื่อความร้อนของชิ้นตัวอย่างถึงอุณหภูมิทดสอบก็จะทำการอบแช่ (Holding time) ใวนานอีก 8 นาที เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน ก่อนทำการทดสอบแรงดึงตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เตรียมชิ้นตัวอย่างด้วยการขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 600, 800 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นใช้ผงอลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 0.3 μm และ 0.1 μm ขัดบนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดชิ้นงานยี่ห้อ Struers รุ่น Dap-7 จึงกัดด้วยสารละลายกรด และนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX 60 M และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคลักษณะของพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV และตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค Energy dispersive spectrometry (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX

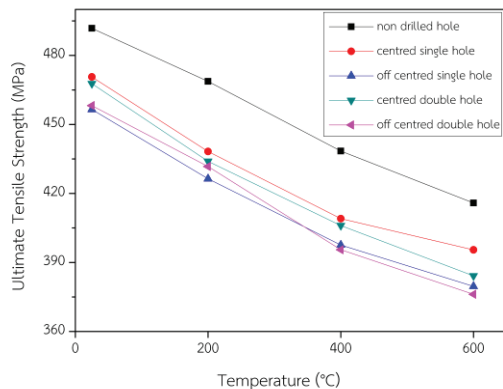
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลด้านต่างๆ

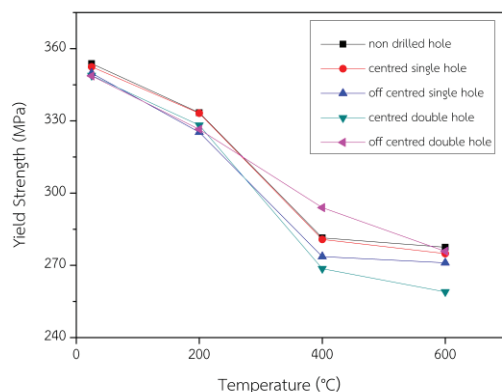
การศึกษาผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ กับอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน

4 ระดับ ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงจุดคราก ดังกราฟในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 จากการทดลองชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรู ทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 25°C ผลการทดลองพบว่าวัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 491.80 MPa ความแข็งแรงจุดครากมีค่า 353.76 MPa และความแข็งมีค่า 156.70 HV ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุมีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงที่สูง (Strain hardening rate) โดยความแข็งแรงที่มีค่าสูงมีผลมาจากเฟส Martensite หรือการเกิด Strain hardening ที่สูง [1, 5, 6] เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นตัวอย่างสามารถรับแรงดึงได้สูงสุด เพราะว่าปริมาณดิสโลเคชัน (Dislocation) มีค่าสูงนั่นเอง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างพบว่าการคอดตัว (Necking) ส่งผลทำให้พื้นที่หน้าตัดตรงบริเวณที่แตกหักมีขนาดลดลง พร้อมกับมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Slow crack growth) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว (Ductile fracture) [7] และวัสดุมีความเหนียวสูงสุดเช่นเดียวกัน คือมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 24.5% คุณสมบัตินี้มีผลมาจากลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟส (Dual phase steels) โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 นั้นจะประกอบด้วยกลุ่มของเฟส Martensite ซึ่งเป็นเฟสที่แข็งกระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน และพื้นหลักของโครงสร้าง Ferrite เป็นเฟสพื้นที่มีความเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 4 จึงทำให้เหล็กกล้าสองเฟสนั้น มีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว [1, 2] แต่เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิจะช่วยให้โครงสร้างของดิสโลเคชันคลายตัวออกจากกัน และทำให้ปริมาณของดิสโลเคชันลดลง จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงจุดคราก และค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงตามอุณหภูมิทดสอบที่เพิ่มขึ้น [8] ซึ่งจากการทดลองที่อุณหภูมิสูง ผลแสดงว่าเป็นการแตกหักที่เกิดในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร (Plastic deformation) น้อยลง [7, 9] และการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Fast crack growth) ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อ

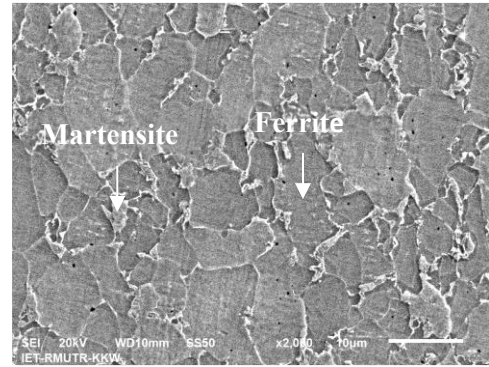
ทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600°C ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง 415.84 MPa ค่าความแข็งแรงจุดครากลดลง 277.52 MPa และความแข็งมีค่า 113.65 HV



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดกับอุณหภูมิ



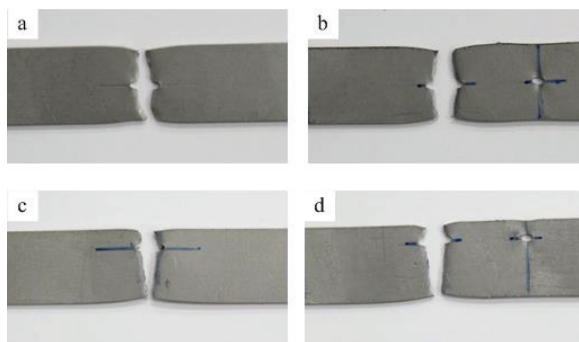
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นหลัก Ferrite และเฟส Martensite ที่กระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) ในรูปแบบต่างๆ กับอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน ปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างที่มีการเจาะรูจะเกิดศูนย์รวมความเค้นสูงสุดที่ขอบของรู [4] ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่มีการเจาะรูเกิดการเสียหายได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรูเจาะ และความเสียหายจะเกิดขึ้นตรงขอบของรูบนชิ้นงานเสมอ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น เพราะการกระจายตัวของความเค้นไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง ส่วนมากจะนำไปสู่การเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก ผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C จะเห็นได้ว่าชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวตรงศูนย์ พบว่าวัสดุมีค่า UTS 470.66 MPa ดังรูปที่ 5 (a) และเจาะรูคู่ตรงศูนย์ มีค่า UTS 467.74 MPa ดังรูปที่ 5 (b) จะมีความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวเยื้องศูนย์ มีค่า UTS 458.50 MPa ดังรูปที่ 5 (c) และเจาะรูคู่เยื้องศูนย์ มีค่า UTS 458.18 MPa ดังรูปที่ 5 (d) เนื่องจากบริเวณหน้าตัดด้านที่มีเนื้อที่น้อยกว่าตรงด้านเยื้องศูนย์จะเริ่มเกิดรอยแตกขึ้นก่อนจนกระทั่งมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะขนาดพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันหรือขาดความต่อเนื่อง และจะขยายตัวไปยังพื้นที่บริเวณหน้าตัดขนาดใหญ่ เป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรน้อยมาก จากผลการทดลองนี้

แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงจุดครากมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเหมือนกัน ซึ่งเกิดจากผลกระทบศูนย์รวมความเค้นรูปแบบต่างๆ โดยจะแปรผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เจาะรูคู่เอียงศูนย์ ทดลองที่อุณหภูมิ 600 °C มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำสุดคือ 376.15 MPa

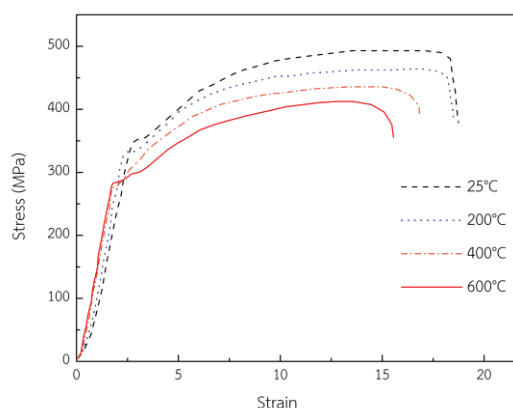


รูปที่ 5 ชิ้นตัวอย่างที่มีการเจาะรู (a) รูเดี่ยวตรงศูนย์ (b) รูคู่ตรงศูนย์ (c) รูเดี่ยวเอียงศูนย์ และ (d) รูคู่เอียงศูนย์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C

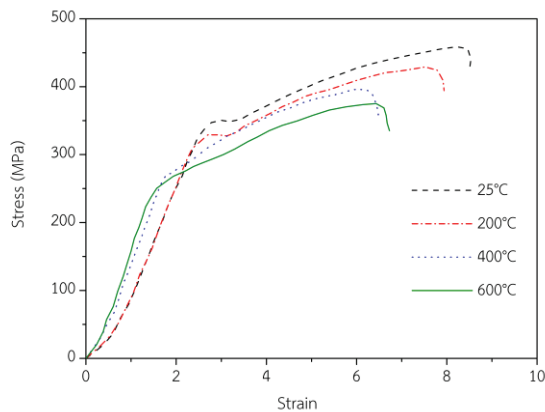
3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain curve ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองภายใต้แรงดึง ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C ผลจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างไม่มีการเจาะรู ดังรูปที่ 6 แสดงถึงพฤติกรรมทางกลที่แตกต่างกันของเส้นกราฟ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าสูงสุด ซึ่งมีผลมาจากความแข็งแรงจุดครากกับความแข็งแรงดึงมีค่าต่างกันหรือบริเวณที่ค่อนข้างกว้าง นอกจากนี้เมื่อเทียบความชันของกราฟในช่วงแรก พบว่าความชันของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงจุดครากต่อความแข็งแรงดึงที่ต่ำ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร (Plastic deformation) ที่เกิดขึ้นมีค่าสูง วัสดุมีการดูดซับพลังงานปริมาณมาก

(High energy absorption) ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ โดยพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ Stress-Strain และการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และผลจากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้น นั่นคือที่อุณหภูมิ 200°C มีค่า UTS 468.73 MPa ที่อุณหภูมิ 400°C มีค่า UTS 438.43 MPa และที่อุณหภูมิ 600°C มีค่า UTS 415.84 MPa ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด ส่วนความสามารถในการยึดตัวก็มีค่าลดลง [10] โดยมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรน้อยลง [11] และจากกราฟในรูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain จากชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวเอียงศูนย์ทดสอบภายใต้แรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C ผลการทดลองแสดงว่าอุณหภูมิมิผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเช่นเดียวกัน และผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างทางด้านสมบัติทางกลอย่างชัดเจน ทั้งค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ค่าความแข็งแรงจุดคราก และความสามารถในการยึดตัว โดยการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงตรงบริเวณขอบของรูบนชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟผลการทดลองชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเจาะรู



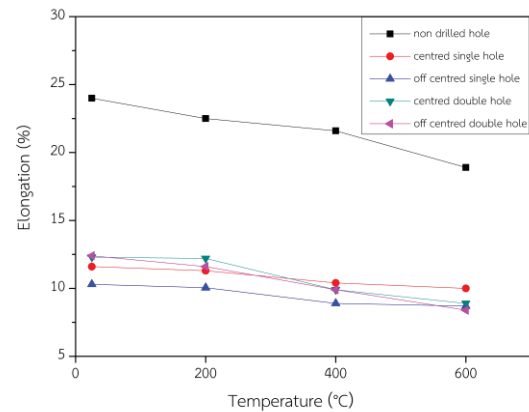
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain curve ที่อุณหภูมิแตกต่างกันจากชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรู



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain curve ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จากชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวเชิงศูนย์

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) โดยความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ผลการทดลองสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25°C การยืดตัวของวัสดุมีค่าสูงสุด คือมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 24.5% ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับความเหนียวของเหล็กกล้าสองเฟสนั้นจะถูกควบคุมโดยขนาดเกรนของ Ferrite และเฟส Martensite ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายตัวเฟส Martensite และสัดส่วนของเฟส Martensite อยู่ที่ประมาณ 5-30% [12, 13] แต่เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มสูงขึ้นคือ 200°C 400°C และ 600°C มีผลให้การยืดตัวมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ [14] นั่นคือเมื่อชิ้นตัวอย่างทดลองได้รับความร้อนมากขึ้น จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล ส่วนการเจาะรูเพื่อทำให้เกิดศูนย์รวมความเค้นที่ชิ้นตัวอย่าง มีผลกระทบอย่างมากต่อความสามารถในการยืดตัว ปรากฏว่าค่าการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงทุกรูปแบบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างที่มีจุดศูนย์รวมความเค้นจะทำให้เกิดจุดร้าวตัวอย่างรวดเร็ว และมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร น้อยลงหรือการยืดตัวน้อย และผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเหมือนกัน ซึ่งความสามารถใน

การยืดตัวมีค่าน้อยที่สุดเกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูคู่เชิงศูนย์ อุณหภูมิทดสอบ 600°C เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าต่ำสุดคือ 8.4% (Minimum hot ductility)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

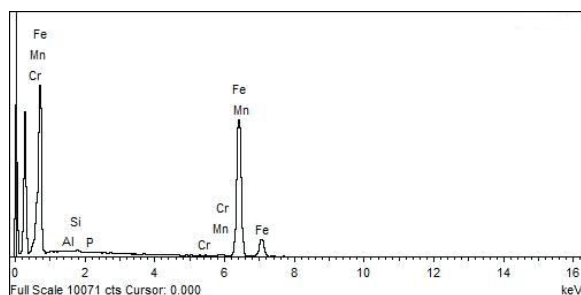
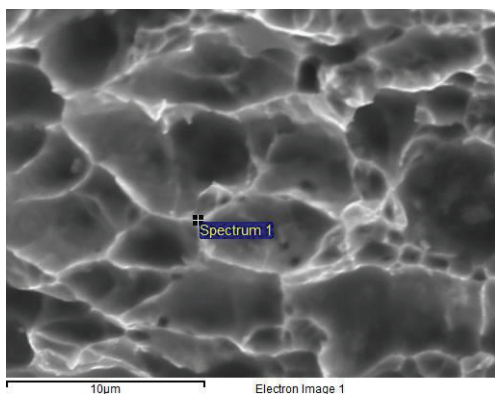
3.3 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectrometry)

ผลการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ยังยืนยันผลได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS โดยแสดง Spectrum เป็นผลลัพธ์ ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS บริเวณพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) พบว่าธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด คือซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn) พิจารณาได้จากตารางที่ 1 ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 9 แสดงผลจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25°C พบว่า Spectrum ที่ 1 มีระดับความเข้มข้นของซิลิคอน (Si) เท่ากับ 0.40% และแมงกานีส (Mn) เท่ากับ 0.89% และจากรูปที่ 10 การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600°C Spectrum ที่ 2 มีระดับความเข้มข้นของซิลิคอน (Si) ลดลง 0.17% และแมงกานีส (Mn) ลดลง 0.78% จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn)

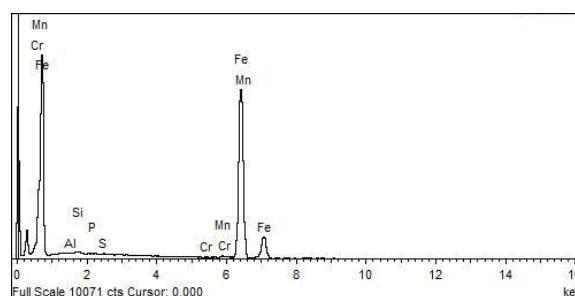
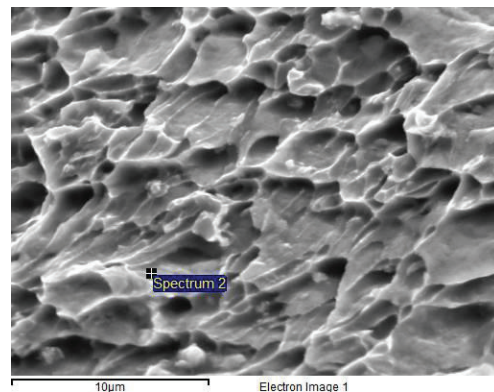
มีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าธาตุอื่น จึงทำให้ซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn) เกิดการแพร่ออกไปรวมตัวกับธาตุอื่นที่ผิวชิ้นงานเป็นชั้นออกไซด์ [15, 16] ซึ่งปริมาณซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn) ที่ลดลง มีผลต่อค่าความแข็งแรงจุดคราก และความแข็งแรงดึงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและสอดคล้องกันกับผลการทดสอบแรงดึงดังที่กล่าวมา

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า SPFC440 (%wt, Balance carbon)

Temperature (°C)	Si	Mn	Al	Cr	P	S	Fe
25	0.40	0.89	0.24	0.07	0.10	-	98.30
200	0.36	0.83	0.06	0.02	0.07	-	98.67
400	0.27	0.74	0.04	-	-	-	98.94
600	0.17	0.78	0.18	0.09	0.03	0.02	98.74



รูปที่ 9 ลักษณะ Fracture surface และผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ที่อุณหภูมิ 25°C

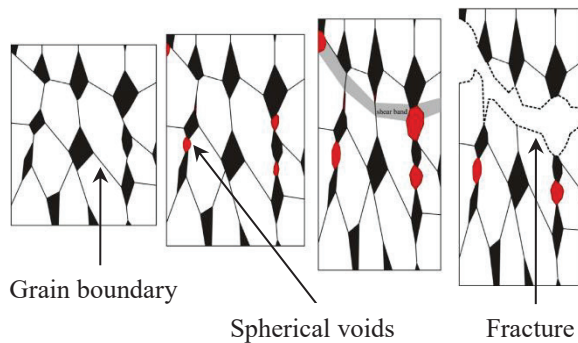


รูปที่ 10 ลักษณะ Fracture surface และผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ที่อุณหภูมิ 600°C

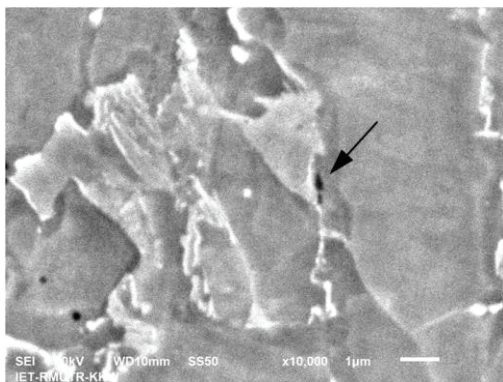
3.4 ผลการศึกษา โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

ความเสียหายของเหล็กกล้าสองเฟสขึ้นอยู่กับเกิดการช่องว่างในเฟส Ferrite ที่มีความเหนียว ซึ่งอาจเกิดจากการแยกตัวของบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส Ferrite และ Martensite และเกิดจากความเสียหายของเฟส Martensite [17] ดังแสดงในรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) จะพบลักษณะที่ขรุขระ (Fibrous fracture surface) โดยกระบวนการขยายตัวของรอยร้าวจากการแตกหักแบบเหนียวค่อนข้างจะช้า ซึ่งลักษณะร่องหลุม (Dimple) ที่ปรากฏบนผิวหน้าแตกหัก เริ่มจากการเกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Void) ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส Ferrite และเฟส Martensite ดังแสดงในรูปที่ 12 (a) และการขยายตัวของช่องว่าง (Void growth) ดังแสดงในรูปที่ 12 (b) จากนั้นมีการขยายตัวของรอยร้าว

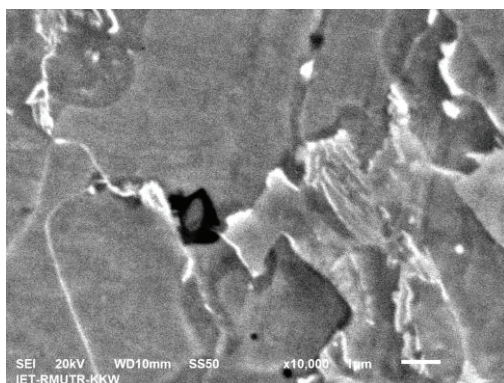
จากช่องว่าง จนเกิดการเชื่อมรวมกันของช่องว่าง (Void coalescence) [17] จนกลายเป็นรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) และการขยายตัวของรอยร้าว ส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยลงและทำให้ความเค้นที่กระทำต่อวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ในที่สุดก็เกิดการแตกหัก (Fracture) ออกจากกันของวัสดุ



รูปที่ 11 ลักษณะกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นในระดับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเหนียว [17]



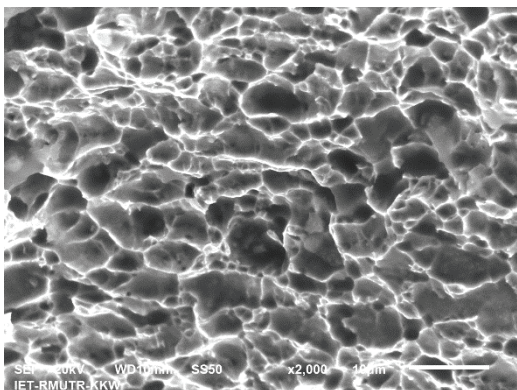
(a) ช่องว่างขนาดเล็ก (Void)



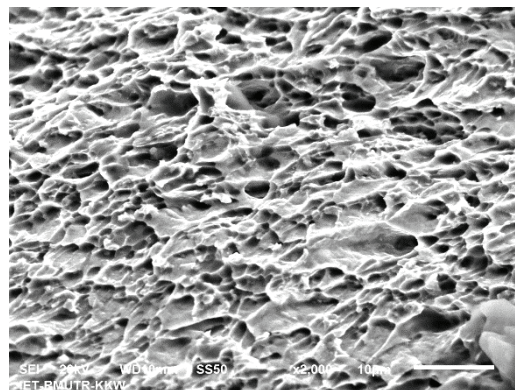
(b) การขยายตัวของช่องว่าง (Void growth)

รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของช่องว่าง (Void)

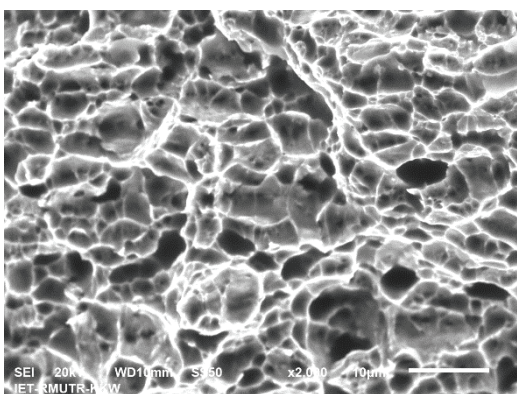
ผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวตรงรอยแตกของชิ้นตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) พบว่าลักษณะพื้นผิวแตกแบบเหนียวของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 แสดงให้เห็นช่องว่างขนาดเล็ก (Void) ลักษณะเป็นร่องหลุม (Dimple) ที่เกิดจากช่องว่างมาเชื่อมกัน (Micro-void coalescence) [18] โดยพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ดังรูปที่ 13 และการทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C ดังรูปที่ 14 เป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) มีจำนวนและขนาดของหลุมลึก (Dimple) ที่มีการกระจายตัวค่อนข้าง Homogeneous [19] ผิวหน้าแตกที่สามารถมองเห็นร่องหลุมแบบสมมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับผิวแตกจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 400°C ดังรูปที่ 15 และการทดสอบที่อุณหภูมิ 600°C ดังรูปที่ 16 กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงให้เห็นถึงลักษณะร่องหลุมที่เกิดขึ้นแตกต่างไปจากการทดสอบที่อุณหภูมิปกติและที่อุณหภูมิ 200°C อย่างชัดเจน โดยลักษณะของร่องหลุมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะยืดออก (Elongated dimple) คล้ายวงรีและราบเรียบมากขึ้น หรืออาจเรียกลักษณะความเสียหายแบบ Semi-ductile หรือเกิดการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อนขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงและการยืดตัวน้อยลง จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการทดสอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งพิจารณาได้จากลักษณะของพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) โดยมีผลกระทบต่อความเหนียวหรือความสามารถในการยืดตัวของวัสดุที่แตกต่างกัน จากการทดสอบที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความเหนียวลดลง โดยสอดคล้องกันกับผลการทดสอบแรงดึงดังที่กล่าวมา



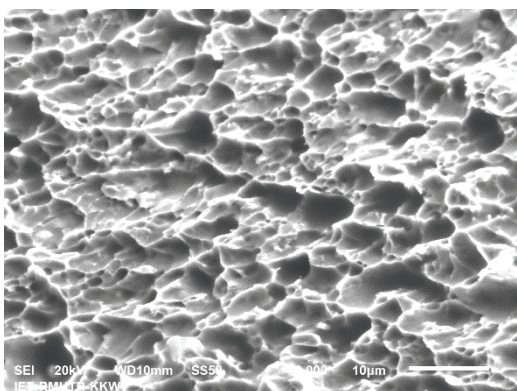
รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 25°C ภาพจาก SEM



รูปที่ 16 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 600°C ภาพจาก SEM



รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 200°C ภาพจาก SEM



รูปที่ 15 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 400°C ภาพจาก SEM

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นกับอุณหภูมิในการทดสอบ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC 440 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1 ผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นในรูปแบบต่างๆ ปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างที่มีเจาะรูตรงศูนย์มีความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเอียงศูนย์ เนื่องจากบริเวณหน้าตัดด้านที่มีเนื้อที่น้อยกว่าตรงด้านเอียงศูนย์จะเริ่มเกิดรอยแตกขึ้นก่อน จนกระทั่งมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะขนาดพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันหรือขาดความต่อเนื่อง

4.2 ผลการทดลอง Stress-Strain curve ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงจุดครากต่อความแข็งแรงดึงที่ต่ำ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร (Plastic deformation) ที่เกิดขึ้นมีค่าสูง วัสดุมีการดูดซับพลังงานปริมาณมาก (High energy absorption) ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 600°C ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด

4.3 การเจาะรูเพื่อทำให้เกิดศูนย์กลางความเค้นที่ขึ้นตัวอย่าง มีผลกระทบต่อความสามารถในการยึดตัว ปรากฏว่าการยึดตัวของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงทุกรูปแบบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างที่มีจุดศูนย์กลางความเค้นจะทำให้เกิดจุดครากตัวอย่างรวดเร็ว และมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Fast crack growth) โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรน้อยลง และผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเหมือนกัน

4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างในระดับจุลภาค เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวตรงรอยแตก ด้วย SEM พบลักษณะพื้นผิวเป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C มีจำนวนและขนาดของหลุมลึก (Dimple) ที่มีการกระจายตัวค่อนข้าง

Homogeneous เมื่อเปรียบเทียบกับผิวแตกจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 600°C ลักษณะร่องหลุมที่เกิดขึ้นแตกต่างไปจากการทดสอบที่อุณหภูมิปกติอย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างของโลหะนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อนขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงและการยึดตัวน้อยลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณโครงการวิจัยนี้ ตามสัญญาเลขที่ A-11/2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lai, Q., Bouaziz, O., Gouné, M. and Brassart, L. Damage and fracture of dual-phase steels: Influence of martensite volume fraction. *Materials Science & Engineering*, 2015; 646: 322-331.
- [2] Thipwipa, S, Viton, U. and Sompong, S. Effects of the tempering temperature on mechanical properties of dual phase steels. *Journal of Metals Materials and Minerals*, 2014; 24: 13-20.
- [3] เฉลิมพล คล้ายนิล จินกมล ลุขจันทร์ และพงศกร หลีตระกูล. การศึกษาอิทธิพลของระยะช่องว่างคมตัดที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2017; 24: 1-12.
- [4] Rosenberg, G., Sinaiová, I. and Juhar, L. Effect of microstructure on mechanical properties of dual phase steels in the presence of stress concentrators. *Materials Science & Engineering*, 2013; 582: 347-358.
- [5] Li, C-N., Yuan, G. and Ji, F-G. Effects of auto-tempering on microstructure and mechanical properties in hot rolled plain C-Mn dual phase steels. *Materials Science & Engineering*, 2016; 665: 98-107.
- [6] Zhao, Z., Tong, T., Liang, J., Yin, H., Zhao, A. and Tang, D. Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of ultra-high strength dual-phase steel. *Materials Science & Engineering*, 2014; 618: 182-188.
- [7] William, d. and Callister, J.R. Materials science and engineering an introduction. 6th ed. John Wiley & Sons Inc, New York, 2003.
- [8] Zhang, M., Cao, W., Dong, H. and Zhu, J. Element partitioning effect on microstructure and mechanical property of the micro-laminated Fe-Mn-Al-C dual phase steel. *Materials Science & Engineering*, 2016; 654: 193-202.
- [9] Jung, S., Jo, Y.H. and Jeon, C. Effects of Mn and Mo addition on high-temperature tensile properties in high-Ni-containing austenitic cast steels used for turbo-charger application. *Materials Science & Engineering*, 2017; 682: 147-155.
- [10] Maa, J., Li, W., Zhang, X. and Kou, H. Tensile properties and temperature-dependent yield strength prediction of GH4033 wrought superalloy. *Materials Science & Engineering*, 2016; 676:165-172.

- [11] Choi, I-R., Chung, K-S. and Kim, D-H. Thermal and mechanical properties of high-strength structural steel HSA800 at elevated temperatures. *Materials and Design*, 2014; 63: 544-551.
- [12] Ramazani, A., Schwedt, A., Aretz, A., Prahl, U. and Bleck, W. Characterization and modelling of failure initiation in DP steel. *Computational Materials Science*, 2013; 75: 35-44.
- [13] Sodjit, S. and Uthaisangsuk, V. Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. *Materials & Design*, 2012; 41: 370-379.
- [14] Qiang, X., Bijlaard, F.S.K. and Kolstein, H. Elevated-temperature mechanical properties of high strength structural steel S460N: Experimental study and recommendations for fire-resistance design. *Fire Safety Journal*, 2013; 55: 15-21.
- [15] Mao, H-H., Qi, X., Cao, J., An, L-C. and Yang, Y-T. Effect of Si on high temperature oxidation of 30Cr 13 stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2017; 24: 561-568.
- [16] Ran, Q., Peng, W., Xu, Y., Li, J. and Xiao, X. Self-repairing behavior of oxidation diffusion layer and phase transformation mechanism during tensile test of 19Cr duplex stainless steels with various Mn content. *Corrosion Science*, 2015; 90: 535-543.
- [17] Kadkhodapour, J., Butz, A. and Ziaei Rad, S. Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial, dual-phase steel. *Acta Materialia*, 2011; 59: 2575-2588.
- [18] Wulpi, D.J. Understanding How Components Fail, ASM International, 2000.
- [19] Kadkhodapour, J., Butz, A., Ziaei-Rad, S. and Schmauder, S. A Micro mechanical study on failure initiation of dual phase steels under tension using single crystal plasticity model. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27: 1103-1125.