

การวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุล่อรถไฟฟ้ความเร็วสูง ที่โครงสร้างทางจุลภาคเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการทางความร้อน ชัยชัย ชี้อตรง

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

Email: chaichayo.sue@vru.ac.th

Received: Jul 26, 2024

Revised: Sep 02, 2024

Accepted: Sep 09, 2024

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาการขยายตัวของรอยร้าวจากการล้าของวัสดุล่อรถไฟฟ้ความเร็วสูงเกรด ER8 ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้งานอยู่ในรถไฟ Airport rail link ในประเทศไทย โดยทำการพิจารณาและทดสอบโครงสร้างของเหล็กล่อรถไฟ 2 กรณีศึกษา ได้แก่ โครงสร้างเหล็กกล้าที่ได้มาตรฐานหรือโครงสร้างดั้งเดิมของล่อรถไฟฟ้ความเร็วสูง ซึ่งมีโครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพิร์ลไลต์ และในกรณีที่ 2 นั้น จะเป็นโครงสร้างของวัสดุล่อรถไฟฟ้ความเร็วสูงที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน เพื่อจำลองล่อรถไฟฟ้ที่ถูกใช้งานจริงและเกิดความร้อนขึ้นขณะใช้งาน โครงสร้างทางจุลภาคของล่อรถไฟฟ้ความเร็วสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์เพิ่มมากขึ้นและเฟสเพิร์ลไลต์ลดน้อยลง การทดสอบสมบัติทางกลนั้นกระทำโดยวิธีการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 และการทดสอบความสามารถในการต้านทานความเสียหายที่เกิดจากการล้า (fatigue) ทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal testing ที่ภาระขนาด 5 กิโลนิวตัน ที่ความถี่ 10 เฮิร์ต ตามมาตรฐาน ASTM E647 ผลที่ได้จากการทดสอบขยายตัวของรอยร้าวล้าด้วยภาระแบบวงรอบ (cyclic load) สามารถนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กล่อรถไฟที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลที่ได้พบว่าการเพิ่มขึ้นของเฟสเฟอร์ไรต์ส่งผลให้วัสดุล่อรถไฟมีความยืดหยุ่นที่สูงขึ้น แต่กลับมีค่าแรงดึงสูงสุดต่ำลง รวมไปถึงความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวล้าในวัสดุที่ต่ำลงไปด้วย

คำสำคัญ : เหล็กล่อรถไฟฟ้, การขยายตัวของรอยร้าวล้า, เฟสเฟอร์ไรต์, เฟสเพิร์ลไลต์

Fracture analysis of the high-speed railway wheel due to changes in microstructure caused by the heat treatment process.

Chaichayo Suetrong

Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage

Email: chaichayo.sue@vru.ac.th

Received: Jul 26, 2024

Revised: Sep 02, 2024

Accepted: Sep 09, 2024

Abstract

This study investigates the fatigue crack propagation in high-speed railway wheel material, grade ER8, used in the Airport Rail Link in Thailand. Two case studies were conducted to examine the structure of railway wheel steel. First is conventional steel structure or the original structure of high-speed railway wheel, consisting of ferrite and pearlite phases. Second is the structure of high-speed railway wheel materials after heat treatment processes to simulate actual operating conditions. Changes in the microstructure of high-speed railway wheel occur, with an increase in ferrite phase and a decrease in pearlite phase. Mechanical properties were tested using ASTM E8 tensile testing standards and fatigue crack propagation resistance testing was conducted using Universal testing machine with a load of 5 kN at a frequency of 10 Hz following ASTM E647 standards. The results showed that the increase in ferrite phase led to higher elongation but lower tensile strength of the railway wheel material. Additionally, it decreased the ability to resist fatigue crack propagation.

Keywords : Wheel steel, Fatigue crack propagation, Ferrite, Pearlite

บทนำ

ล้อยเป็นหนึ่งในส่วนที่สำคัญที่สุดของรถไฟฟ้า เนื่องจากความปลอดภัยและชีวิตของผู้โดยสารสามารถได้รับผลกระทบโดยตรงเมื่อล้อเกิดความเสียหายหรือเกิดความผิดปกติบางอย่างในวัสดุล้อรถไฟ โดยเฉพาะในกรณีของรถไฟฟ้าความเร็วสูง ซึ่งประเทศไทยกำลังจะมีใช้งานในอนาคต ความเร็วในการขับเคลื่อนที่สูงมากของรถไฟนั้นส่งผลให้ความเสี่ยงและอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นจะร้ายแรงกว่าปกติ ดังเช่นตัวอย่างในปี 1998 มีอุบัติเหตุรถไฟที่ร้ายแรงในเยอรมนี โดยมีที่มาจากรอยร้าวขนาดเล็ก ๆ ที่เกิดจากการล้า (fatigue) ส่งผลให้ล้อรถไฟเสียหายในขณะที่ใช้งาน ทำให้เกิดการตกราง เหตุการณ์นี้มีผู้เสียชีวิตและได้รับบาดเจ็บจำนวนมาก[1] รวมถึงอีกหลากหลายเหตุการณ์ในต่างประเทศ ทำให้ชิ้นส่วนสำคัญของรถไฟฟ้าความเร็วสูงได้ถูกนำมาพิจารณาในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น กลไกการเกิดความเสียหาย ขั้นตอนการผลิตที่มีคุณภาพ การออกแบบและการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อหารูปแบบโครงสร้างของล้อที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และมีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามทำความเข้าใจกับกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุล้อรถไฟ[2-4] โดยล้อรถไฟเกรด ER8 เป็นหนึ่งในเกรดเหล็กล้อรถไฟที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีคุณสมบัติทางกลตามมาตรฐาน EN 13262 ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กที่ใช้ในการผลิตล้อรถไฟความเร็วสูงนั้นจะประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเฟสเฟิร์ลโลด์เป็นหลัก สัดส่วนที่เหมาะสมของทั้งสองเฟสในโครงสร้างทางวัสดุเป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะจะสามารถช่วยยืดระยะเวลาการใช้งานของล้อรถไฟและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้ จากงานวิจัยของ Peixoto และคณะ[5] ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของรอยร้าวล้าในล้อรถไฟ AVE ในประเทศสเปน โดยที่

อัตราการเจริญเติบโตของรอยร้าวล้าภายใต้ภาระที่กระทำในทิศทางต่าง ๆ ถูกวัดโดยใช้ชิ้นงานตัวอย่าง Compact tension (CT) ตามมาตรฐาน ASTM E647 และเปรียบเทียบกับการทดลองภาระแบบวงรอบที่ผสมมากกว่าหนึ่งทิศทาง ในงานวิจัยของ Ren และคณะ[6] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเสียหายของล้อรถไฟ โดยรอยเริ่มต้นจากพื้นผิวของล้อรถไฟและขยายความลึกของรอยร้าวมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง และเกิดความเสียหายขึ้นในที่สุด งานวิจัยของ Zhang และคณะ[7] ได้ให้ข้อมูลว่าการรับภาระความเค้นในทิศทางที่แตกต่างกันนั้นส่งผลต่อพฤติกรรมการแตกของเหล็กล้อรถไฟอย่างชัดเจน นอกจากนี้ อุณหภูมิระหว่างใช้งานยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าและอายุการใช้งานของล้อรถไฟเปลี่ยนแปลงไป งานวิจัยของ Fang และคณะ [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับขีดจำกัดของวัสดุล้อรถไฟที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยผลที่ได้คือ อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ และมีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดขึ้นของรอยร้าวจากการรับภาระแบบวงรอบหรือการล้า (fatigue) รวมถึงอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าที่เปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย ในงานวิจัยของ Maya Johnson และคณะ[9] ได้ศึกษาการเจริญเติบโตของรอยร้าวในเหล็กรางรถไฟสองชนิดที่มีโครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วยเฟสเฟิร์ลโลด์ทั้งหมด พบว่าความสามารถในการต้านทานการเจริญเติบโตของรอยร้าวล้าที่มีค่าความเข้มข้นของความเค้น (stress intensity factor) ในช่วงที่ต่ำนั้นจะได้รับอิทธิพลจากระยะห่างระหว่างชั้นในโครงสร้างของเฟสเฟิร์ลโลด์ โดยเฟสเฟิร์ล

โลตส์ที่มีความละเอียดของโครงสร้างสูงกว่าจะมีคุณสมบัติที่แข็งแรงกว่า

การพัฒนารถไฟฟ้าความเร็วสูงมีความสำคัญอย่างมากต่อประเทศไทยในหลาย ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มความสะดวกรวดสบายในการเดินทาง โดยรถไฟฟ้าความเร็วสูงสามารถลดเวลาเดินทางระหว่างเมืองใหญ่ในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ผู้คนสามารถเดินทางไปมาระหว่างกันได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มความสะดวกรวดสบายในการทำธุรกิจและการท่องเที่ยวในประเทศ นอกจากนี้ยังช่วยลดความหนาแน่นในการจราจรและลดค่าใช้จ่ายในการเดินทางทำให้เกิดประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้าย รวมไปถึงสร้างงานจำนวนมากในระหว่างการก่อสร้าง การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงนั้นไม่เพียงแต่ช่วยให้ประเทศไทยเจริญเติบโตอย่างยั่งยืน แต่ยังเป็นการทำให้อุณหภูมิคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นด้วย นอกจากการลดเวลาเดินทางและการขนส่ง ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการลดการใช้งานรถส่วนตัวและการลดการปล่อยมลพิษในอากาศ ในปัจจุบันประเทศไทยมีแผนพัฒนารถไฟฟ้าความเร็วสูงในหลายเส้นทาง ตามยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบคมนาคมของไทย ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) โดยแบ่งเป็นเส้นทางรถไฟฟ้าความเร็วสูงรวมระยะทางทั้งสิ้น 2,468 กิโลเมตร และมีโครงการจัดซื้อรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก 200 คัน ดังนั้นความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับรถไฟฟ้าความเร็วสูงจึงเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับประเทศไทยในปัจจุบันและอนาคต ในงานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการเพิ่มความมั่นคงและความปลอดภัยในการใช้งานโดยการพิจารณาและศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพของวัสดุล้อยรถไฟฟ้าความเร็วสูงเมื่อรับภาระทางกลแบบวงรอบ (fatigue) ซึ่งเป็นรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดในการใช้งานวัสดุทางวิศวกรรม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กล้อยรถไฟฟ้าความเร็วสูง
2. เพื่อศึกษาความทนทานต่อการขยายตัวของรอยร้าวในวัสดุล้อยรถไฟฟ้าเมื่อรับภาระแบบวงรอบ
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและการต้านทานการแตกหัก
4. เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ทั้งในด้านการผลิตและซ่อมบำรุงในอุตสาหกรรมระบบราง

วัสดุ

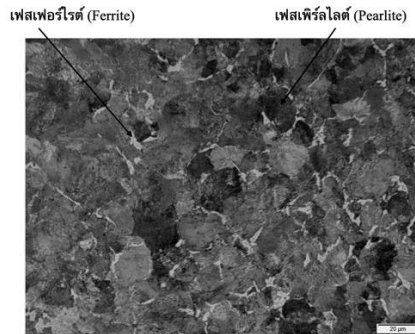
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กล้อยรถไฟฟ้าเกรด ER8 ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในรถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยบริเวณของล้อที่ถูกเลือกมาเป็นตัวอย่างทดสอบคือขอบล้อ (web) ซึ่งเป็นบริเวณที่รับภาระทางกลมากกว่าบริเวณอื่น หากเกิดความเสียหายรุนแรงที่ขอบล้อ อาจส่งผลให้รถไฟทั้งขบวนตกลงได้ ดังนั้นขอบล้อจึงเป็นบริเวณที่ต้องมีความแข็งแรงสูงและเหมาะสมที่จะนำมาทดสอบมากกว่าส่วนอื่น ๆ โดยในรูปที่ 1 แสดงบริเวณของล้อยรถไฟฟ้าที่ถูกตัดออกไปเพื่อทำชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ โดยใช้วิธีการตัดเหล็กด้วยแก๊สเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนในบริเวณที่ต้องการสำหรับการทดสอบแรงดึง และ การทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวจากภาระวงรอบต่อไป สำหรับปริมาณองค์ประกอบเคมีของชิ้นงานตัวอย่างนั้นถูกทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ OES ผลการวิเคราะห์พบว่าวัสดุล้อยรถไฟฟ้าเกรด ER8 ประกอบด้วยคาร์บอน (C) 0.563%, แมงกานีส (Mn) 0.709%, ซิลิคอน (Si) 0.222%, นิกเกิล (Ni) 0.352%, โครเมียม (Cr) 0.208%, ฟอสฟอรัส

(P) 0.045%, โมลิบดีนัม (Mo) 0.123% และ กำมะถัน (S) 0.040% โดยน้ำหนัก ค่าองค์ประกอบธาตุที่ได้รับจากการตรวจสอบมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zeng และคณะ[9] และถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบธาตุปกติของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐานลัทธิไฟเกรด ER8



รูปที่ 1 ลัทธิไฟฟ้าความเร็วสูงเกรด ER8

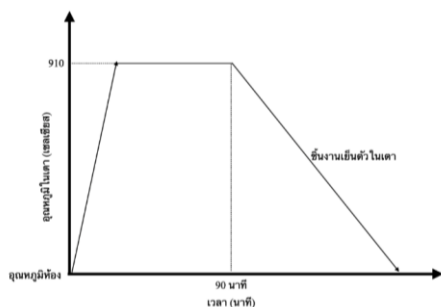
โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุลัทธิไฟถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (LOM) ตามที่แสดงในรูปที่ 2 โดยผิวของชิ้นงานตัวอย่างถูกขัดและกัดด้วยสาร Nital ความเข้มข้น 2% สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานลัทธิไฟฟ้าความเร็วสูงแบ่งออกเป็น 2 เฟส พื้นที่สีเทาเข้มคือเฟสเพิร์ลไลต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและสามารถยึดตัวได้ดีภายใต้แรงดึง ในขณะที่พื้นที่สีขาวซึ่งมีปริมาณที่น้อยกว่าคือเฟสเฟอร์ไรต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงน้อยแต่มีความเหนียวสูง จากการวิเคราะห์ภาพโดยใช้การความชัดเจนของสีพบว่าปริมาณของเฟสเพิร์ลไลต์เท่ากับ 95.09% และเฟสเฟอร์ไรต์ 4.91% ซึ่งโครงสร้างของเหล็กลัทธิไฟฟ้าเกรด ER8 ที่ได้จากชิ้นงานตัวอย่างมีความใกล้เคียงกับวัสดุลัทธิไฟฟ้าความเร็วสูงทั่วไปในงานวิจัยอ้างอิง[8, 10]



รูปที่ 2 โครงสร้างทางจุลภาคของลัทธิไฟฟ้าความเร็วสูงเกรด ER8

กระบวนการทางความร้อน

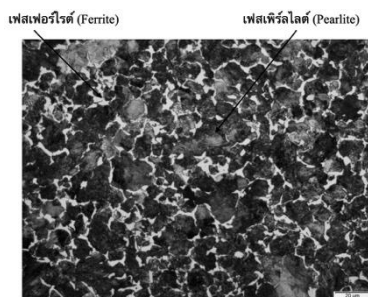
กระบวนการทางความร้อน (heat treatment process) ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุลัทธิไฟคำนวณด้วยโปรแกรม ThermoCalc โดยใช้ค่าองค์ประกอบธาตุของวัสดุเพื่อสร้างแผนภาพการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่เทียบเวลา (TTT diagram) และแผนภาพการเย็นตัวต่อเนื่อง (CCT diagram) จากนั้นทำการกำหนดขั้นตอนของกระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสม โดยกระบวนการทางความร้อนที่เลือกใช้เริ่มต้นจากการนำชิ้นงานทดสอบเข้าไปอบในเตาจนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 910°C เป็นเวลา 90 นาที เพื่อให้โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่มีความสมดุลทั้งหมด โดยอุณหภูมิที่เลือกใช้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยอ้างอิง[11] จากนั้นปิดเตาและปล่อยให้ชิ้นงานระบายความร้อนอย่างช้า ๆ ในเตาอบเพื่อให้วัสดุมีเวลามากพอที่จะเกิดโครงสร้างที่มีปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ที่เพิ่มมากขึ้น โดยรูปที่ 3 แสดงแผนภาพอุณหภูมิและระยะเวลา



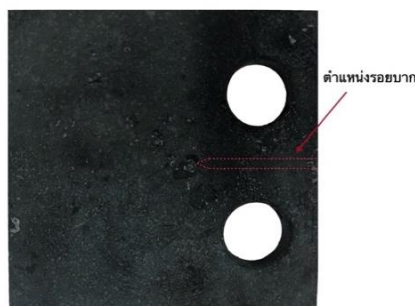
รูปที่ 3 แผนภาพอุณหภูมิและระยะเวลา
ของกระบวนการทางความร้อน

ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะถูกตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป โดยภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM) แสดงในรูปที่ 4 สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่แตกต่างจากโครงสร้างตั้งต้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์นั้นเพิ่มขึ้นเป็น 13.42 % และปริมาณของเฟสเพิร์ลไลต์ลดลงเหลือ 86.58% นอกจากนี้กระบวนการทางความร้อนสำหรับชิ้นงานทดสอบ จำเป็นต้องพิจารณาเกี่ยวกับความเค้นคงค้างของวัสดุ (residual stress) เนื่องจากเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวและเมื่อเย็นลงวัสดุจะเกิดการหดตัวลงและเกิดความเค้นคงค้างขึ้นในชิ้นงานทดสอบ ซึ่งค่าความเค้นคงค้างนี้มีโอกาสที่จะส่งผลต่อความผิดพลาดในการทดสอบทางกลได้ โดยเฉพาะการทดสอบการขยายตัวของรอยร้าว เนื่องจากการรับภาระแบบวงรอบ ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อค่าความเค้นคงค้าง ดังนั้นชิ้นงานทดสอบที่นำเข้าสู่เตาอบจึงเป็นชิ้นงานทดสอบที่ยังไม่ได้ทำรอยบากในชิ้นงาน และหลังจากชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการทางความร้อนเสร็จสิ้น ชิ้นงานทดสอบถูกนำไปตัดสร้างรอยบากอีกครั้ง ด้วยขนาดตามมาตรฐานการทดสอบของชิ้นงาน CT โดยตำแหน่งของรอยบากในชิ้นงานแสดงในรูปที่ 5 ด้วยเส้นประสีแดง โดยความยาวของรอย

บากวัดจากจุดศูนย์กลางของจุดยึดในการทดสอบเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 โครงสร้างทางจุลภาคของล้อ
รถไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน



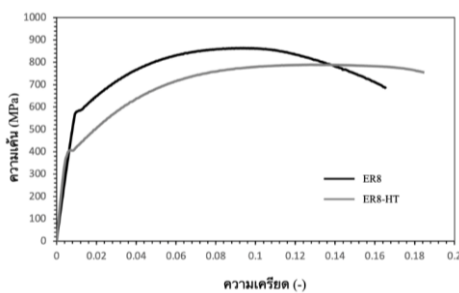
รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบหลังผ่านกระบวนการ
ทางความร้อนและตำแหน่งของรอยบาก

ผลการทดลอง

การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้ารถไฟความเร็วสูงเกรด ER8 กำหนดขนาดของชิ้นงานตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยกำหนดความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 5 มม. และความยาวของแกนวัด (gauge length) เท่ากับ 25 มม. การทดสอบแรงดึงใช้เครื่องทดสอบ universal testing machine ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น 250 kN โดยให้แรงดึงอย่างสม่ำเสมอด้วยความเร็วเท่ากับ 3 มม./นาที ที่อุณหภูมิห้อง

ข้อมูลเกี่ยวกับการยืดของชิ้นงานทดสอบถูกเก็บค่าโดยใช้เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคอร์ริเลชัน (DIC) ตั้งแต่เริ่มต้นถึงชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแสดงในรูปที่ 6 สำหรับชิ้นงานทดสอบโครงสร้างดั้งเดิม (ER8) แสดงผลโดยใช้เส้นสีดำ และชิ้นงานที่ผ่านการบวมการทางความร้อน (ER8-HT) แสดงผลโดยขึ้นเส้นสีเทา



รูปที่ 6 กราฟผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

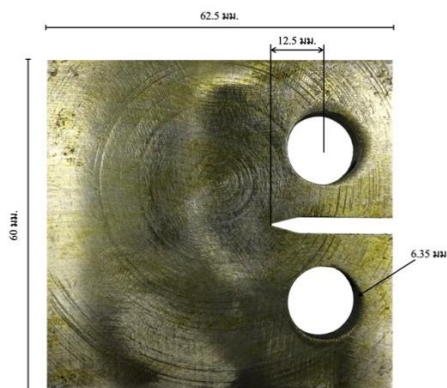
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลจากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อโครงสร้างพบว่าค่าความเค้นครากหรือค่าความเค้นสูงสุดก่อนที่วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างถาวร (yield strength) ชิ้นงานตัวอย่าง ER8 เท่ากับ 578.52 MPa ส่วนชิ้นงานตัวอย่าง ER8-HT นั้นเท่ากับ 406.07 MPa ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ของตัวอย่าง ER8 เท่ากับ 863.29 MPa ส่วนชิ้นงานตัวอย่าง ER8-HT นั้นเท่ากับ 789.93 MPa และค่าความยืดหยุ่น (elongation) ของชิ้นงานตัวอย่าง ER8 เท่ากับ 16.56% ส่วนชิ้นงานตัวอย่าง ER8-HT นั้นเท่ากับ 18.41% โดยค่าผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน ER8 มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอ้างอิง[9-10] จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าความแข็งแรงของตัวอย่างที่

ER8 นั้นมีค่าที่สูงกว่าชิ้นงานตัวอย่าง ER8-HT ทั้งค่าความเค้นสูงสุดและความเค้นครากเนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคมีอัตราส่วนของเฟสเฟอไรต์ซึ่งมีคุณสมบัติที่แข็งแรงในปริมาณที่เยอะกว่า ในทางกลับกันชิ้นงาน ER8-HT ซึ่งผ่านกระบวนการทางความร้อนและมีอัตราส่วนของเฟสเฟอไรต์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม

การทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าว

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานตัวอย่าง Compact tension (CT) ขนาดของชิ้นงานทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E647 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวจากการรับภาระแบบวงรอบ โดนครวมความหนาที่เหมาะสมของชิ้นงานทดสอบ CT ตามที่มาตรฐานแนะนำควรอยู่ระหว่าง $W/20 \leq B \leq W/4$ มม. โดยในงานวิจัยนี้ความกว้าง (W) ของชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 50 มม. ช่วงความหนาที่เหมาะสมของชิ้นงานทดสอบจึงควรอยู่ในช่วง $2.5 < B < 12.5$ มม. ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 5 มม. อีกทั้งเพื่อให้สอดคล้องกับขนาดความหนาของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วย ชิ้นงานทดสอบถูกแสดงในรูปที่ 7 โดยการตัดรูปทรงชิ้นงานนั้นใช้วิธีการตัดด้วยลวด (wire cut) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความแม่นยำสูง การทดสอบหรือคำนวณหาอัตราการขยายตัวของรอยร้าวจำเป็นต้องพิจารณาค่าความเข้มข้นของความเค้น (K) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญมาก โดยมีเงื่อนไขและโหมดต่าง ๆ ที่สามารถใช้ในการพิจารณา เช่น โหมดที่1:แรงดึงเปิด, โหมดที่2:แรงเฉือนในระนาบเดียวกับความหนา และ โหมดที่ 3:แรงเฉือนในระนาบตั้งฉากกับความหนา นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการรับภาระ

แบบผสมที่ใช้ทั้ง 2 โหมด หรือมากกว่าไปพร้อมกัน โดยการทดสอบจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนสูง



รูปที่ 7 ชิ้นงานทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวจากการระงวรอบ

อย่างไรก็ตามอ้างอิงจากงานวิจัยของ Borges และคณะ[12] โหมดที่ 1 เป็นโหมดที่มีความสำคัญที่สุดและสามารถส่งผลกระทบมากที่สุดต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำโหมด 1 มาใช้ในการทดสอบการขยายตัวของรอยร้าว สำหรับการทดสอบการรับภาระแบบวงรอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวของรอยร้าวและค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของความเค้นระหว่างค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุด (ΔK) แสดงในสมการที่ 1 โดยค่า $f(\alpha)$ คือฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นงานทดสอบ สามารถคำนวณได้โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM 647 และสามารถคำนวณหาอัตราการขยายตัวของรอยร้าวต่อรอบภาระ (da/dN) ได้โดยใช้ The Paris' law ดังแสดงในสมการที่ 2 ซึ่งค่าคงที่ของ Paris (c, m) สามารถหาได้จากผลการทดลอง

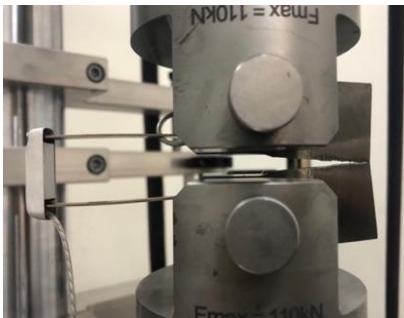
$$\Delta K = \frac{\Delta F}{B\sqrt{W}} f(\alpha) \quad (1)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

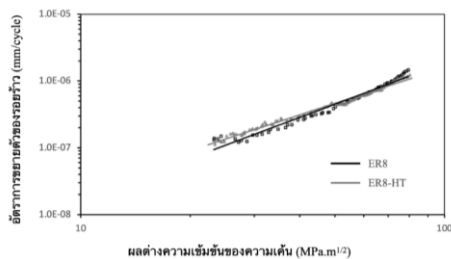
การทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวด้วยเครื่อง Universal testing Machine ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น 250 kN ด้วยความถี่ 10 เฮิร์ต และอัตราสัดส่วนแรงกดและแรงดึง (R) เท่ากับ 0.1 เพื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวของวัสดุอัลลอยไฟฟ้าที่มีโครงสร้างทางจุลภาคที่แตกต่างกัน ในการทดสอบนี้ใช้เครื่องวัดระยะหรือ Extensometer ที่มีความยาวของเกจวัดเท่ากับ 30 มม. ซึ่งถูกติดตั้งที่ปากของชิ้นงานทดสอบ CT ดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อวัดอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งที่ถูกดึง โดยระยะการเปิดของปากรอยร้าว (CMOD) ของชิ้นงานทดสอบ CT ถูกใช้ในการคำนวณขนาดของรอยร้าว นอกจากนี้การสร้างรอยร้าวเริ่มต้น (pre-crack) เป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM E647 แนะนำให้สร้างรอยร้าวเริ่มต้นที่มีความยาวอย่างน้อย 10% ของความหนาของชิ้นงานทดสอบหรืออย่างน้อยควรมากกว่า 1 มม. ในงานวิจัยนี้ความยาวของรอยร้าวเริ่มต้นของตัวอย่าง CT คือ 2.5 มม. ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาก่อนที่จะทำการทดสอบและเก็บผลการทดสอบมาวิเคราะห์ต่อไป

รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวจากการรับภาระแบบวงรอบ โดยในช่วงต้นหรือภายในช่วง ΔK ระหว่าง 20-40 MPa·m^{1/2} ชิ้นงานทดสอบ ER8 ที่มีสัดส่วนโครงสร้างประกอบด้วยเฟสเฟอไรต์: เฟอร์ไรต์ 95.09:4.91 มีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่ต่ำกว่าชิ้นงานทดสอบ ER8-HT ที่มีสัดส่วนโครงสร้างเฟอไรต์: เฟอร์ไรต์ 86.58:13.42 อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามในช่วงระยะกลางที่ ΔK อยู่ระหว่าง 40-60 MPa·m^{1/2} อัตราการขยายตัวของรอยร้าวของตัวอย่าง

ER8 เริ่มมีความใกล้เคียงกับชิ้นงานทดสอบ ER8-HT และในช่วงท้ายที่ค่า ΔK อยู่ระหว่าง 60-80 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ชิ้นงานทดสอบ ER8 เริ่มมีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่สูงกว่าชิ้นงาน ER8-HT อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 8 ภาพแสดงการทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวและตำแหน่งของ Extensometer



รูปที่ 9 ผลทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวในวัสดุอัลลอยไฟฟ้าที่ค่าความแตกต่างของความเค้นเชิงความเค้นใด ๆ

เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงาน ER8 และ ER8-HT ผลการทดสอบพบว่าโครงสร้างวัสดุที่แตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวเมื่อรับภาระ ΔK ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน ER8 นั้นมีคุณสมบัติที่แข็งแรงกว่าเนื่องจากปริมาณของเฟสเฟิร์ลโลดท์ที่สูงกว่าส่งผลให้สามารถรับภาระ ΔK ในช่วงระยะต้นและระยะกลางได้ดี ส่วนโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน

ER8-HT มีคุณสมบัติยืดหยุ่นที่ดีกว่าจากปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ที่เพิ่มขึ้นมาจากกระบวนการทางความร้อน ส่งผลให้สามารถในการรับภาระ ΔK ในช่วงปลายหรือช่วงระยะสุดท้ายก่อนเกิดการแตกหักได้ดีกว่าสำหรับค่าคงที่ของ Paris ที่ได้จากการทดลอง ค่า c และ m ของชิ้นงานทดสอบถูกแสดงในตารางที่ 1 ค่าคงที่เหล่านี้มีความสำคัญในการคำนวณหาอัตราการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้รับภาระ ΔK ใด ๆ โดยใช้สมการของ Paris' law

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของ Paris

ชิ้นงาน	c	m
ER8	1.52×10^{-10}	2.04
ER8-HT	4.38×10^{-10}	1.78

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางกลโดยใช้การทดสอบแรงดึงและการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าว เนื่องจากการรับภาระแบบวงรอบ โดยชิ้นงานทดสอบนั้นมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้กระบวนการทางความร้อนโดยการอบวัสดุที่อุณหภูมิ 910 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที และปล่อยให้เย็นตัวในเตา นั้นส่งผลให้ปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุอัลลอยไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 8.51%

2. ผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน ER8-HT ที่มีปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์มากขึ้น มีค่าความแข็งแรงลดลงทั้งค่าความเค้นครากและความเค้นสูงสุด แต่ในทางกลับกันค่าความยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของเฟสเฟอร์ไรต์นั้นเป็นเฟสอ่อน

และมีความสามารถในการยืดหยุ่นได้ดีกว่าเฟสเพิร์ลโลดที่มีคุณสมบัติเป็นเฟสแข็ง

3. ผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดจากการะงรอบได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับภาระความเข้มข้นของความเค้นที่แตกต่างกันของโครงสร้างทางจุลภาคทั้งสองรูปแบบ โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง ER8 ที่มีปริมาณเฟสเพิร์ลโลดสูงกว่าแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวลำที่สูงกว่าชิ้นงานตัวอย่าง ER8-HT ในช่วงที่ค่าความเข้มข้นของความเค้นอยู่ในปริมาณที่ต่ำ (ΔK ระหว่าง $20-40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) และใกล้เคียงกันในช่วงกลาง (ΔK ระหว่าง $40-60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) แต่ในช่วงท้ายที่ขนาดของรอยร้าวลำมีความยาวใกล้ถึงความยาววิกฤตหรือใกล้เกิดการแตกหัก ค่าความเข้มข้นของความเค้นที่สูง (ΔK ระหว่าง $60-80 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) โครงสร้างทางจุลภาคที่มีปริมาณเฟสเพอร์ไรต์มากกว่า มีความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวลำได้ดีกว่า

4. พิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานจริงของล้อรถไฟความเร็วสูง ข้อได้เปรียบของรูปแบบโครงสร้างทางจุลภาค ER8-HT คือความเหมาะสมในการใช้งานล้อรถไฟในการรับภาระแบบงรอบที่มากกระทำจำนวนที่สูงได้ดีกว่ารูปแบบโครงสร้างทางจุลภาคของ ER8 เนื่องจากอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่ต่ำกว่าเมื่อรับภาระงรอบ (cyclic load) แต่ความแข็งแรงที่ลดลงนั้นอาจส่งผลให้การแตกหักของวัสดุเกิดได้ง่ายขึ้นเมื่อรับภาระคงที่ (static load) ดังนั้นในการวางแผนซ่อมบำรุงล้อรถไฟจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าความเข้มข้นของความเค้นที่เกิดขึ้นในการใช้งานจริงและคุณสมบัติของโครงสร้างวัสดุประกอบกัน

5. สำหรับการตรวจสอบและคำนวณหาอัตราการขยายตัวของรอยร้าว โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของความเค้น

(K) ที่เกิดจากการใช้งานจริง และค่าคงที่ Paris (c และ m) ของวัสดุล้อรถไฟ เมื่อตรวจพบรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุล้อรถไฟ มีโอกาสในการคำนวณระยะเวลาในการใช้งานที่เหลืออยู่ของล้อรถไฟได้โดยใช้สมการ Paris' law

6. สัดส่วนของเฟสเพอร์ไรต์และเฟสเพิร์ลโลดที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาอัตราการขยายตัวของรอยร้าวลำ สัดส่วนเฟสเพอร์ไรต์ 95.09% และเฟสเพอร์ไรต์ 4.91% นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตล้อรถไฟในอุตสาหกรรมระบบรางในอนาคต

ผลการทดสอบเหล่านี้ช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุในเชิงกล ช่วยในการพัฒนาวัสดุล้อรถไฟความเร็วสูงที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านการออกแบบโครงสร้าง การซ่อมบำรุงรักษาและการวิเคราะห์ความเสียหายในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์ทั้งเครื่องทดสอบและคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑูร อุตยแสงสุข ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ให้คำชี้แนะและความรู้ที่เป็นประโยชน์งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

References

- [1] V. Esslinger, R. Kieselbach, R. Koller and B. Weisse, "The railway accident of Eschede – Technical background," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 11, Aug 2004, pp. 515-535.

- [2] X. Y. Fang, W. Huang, X. F. Yang and J. G. Wang, "Effects of temperature on fatigue cracks initiation and propagation T for a high-speed railway wheel rim steel," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 109, Jan. 2020, p. 104376.
- [3] Y. Hu, L. Zhou, H. H. Ding, R. Lewis, Q. Y. Liu, J. Guo and W. J. Wang, "Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading," *Tribology International.*, vol. 154, Sep. 2021, p. 106685.
- [4] R. M. Nejad and F. Berto, "Fatigue fracture and fatigue life assessment of railway wheel using non-linear model for fatigue crack growth," *Int. J. Fatigue*, vol. 153, Aug. 2021, p. 106516.
- [5] D. F. C. Peixoto and P. M. S. T. De Castro, "Fatigue crack growth of a railway wheel," *Eng. Fail. Anal.* vol. 82, Aug. 2017, pp. 420–434.
- [6] X. Ren, F. Wu, F. Xiao and B. Jiang, "Corrosion induced fatigue failure of railway wheels," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 55, June. 2015, pp. 300–316.
- [7] Q. Zhang, I. Toda-Caraballo, Q. Lic, J. Han, J. Han, J. Zhao and G. Dai, "Tension-shear multiaxial fatigue damage behavior of high-speed railway wheel rim steel," *Int. J. Fatigue*, vol. 133, Dec. 2020, pp. 105416.
- [8] X. Y. Fang, Y. X. Zhao and H. W. Liu, "Study on fatigue failure mechanism at various temperatures of a high-speed railway wheel steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 696, Apr. 2017, pp. 299–314.
- [9] S. M. Johnson, A. J. Ramirez and A. Toro, "Fatigue crack growth rate of two pearlitic rail steels," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 138, Mar. 2015, pp. 63–72.
- [10] D. Zeng, J. Wang, L. Lu, C. Shen, J. Guo, T. Xu and Z. Wanga, "Fatigue crack growth behavior of railway wheel steel modified by sulfides enveloping oxides inclusions," *Int. J. Fatigue*, vol. 175, Jul. 2023, p. 107811.
- [11] J. Z. Chen, B. Zhang, L. R. Zeng, Z. M. Song, Y. Y. She and G. P. Zhang, "Optimal bainite contents for maximizing fatigue cracking resistance of bainite/ martensite dual-phase 25CrMo4 steels," *Steel Res. Int.*, vol. 89, May. 2018, p. 1700562.
- [12] M. F. Borges, F. V. Antunes, P. Prates, R. Branco, J. M. Vasco-Olmo and F. A. Díaz, "Model for fatigue crack growth analysis," *Proc. Struct. Integrity*, vol. 25, Jan. 2020, pp. 254–261.