

การคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ

Numerical Calculation for the Critical Initial Flaw Size of Flash-Butt Welded Rail

กชพร ถาดสูงเนิน^{1,*}, นิติกอร์ นรภัยพิพาษา², อาณัติ หาทรัพย์³ และ ชาวสวน กาญจนมัย¹
Kotchaporn Thadsoongnoen^{1,*}, Nitikorn Noraphaiphaksa², Anat Hasap³ and Chaosuan Kanchanomai¹

¹ศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิศวกรรมและสมรรถนะของวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

²บริษัท นิติกอร์ รีเสิร์ช พาร์ตเนอร์ จำกัด อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

³ศูนย์ทดสอบมาตรฐานระบบขนส่งทางราง สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

¹Center of Materials Engineering and Performance, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat University, Pathumthani 12120

²Nitikorn Research Partner Co. Ltd., Lumlukka, Pathumthani 12150

³Railway Transportation System Testing Center, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Pathumthani 12120

(Received: February 24, 2020, Revised: July 2, 2020, Accepted: July 18, 2020)

บทคัดย่อ

ตำหนิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ อาจเกิดระหว่างการเชื่อม และ/หรือ เกิดระหว่างการใช้งาน ตำหนิเหล่านี้เป็นอันตรายต่อรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ โดยขนาดของตำหนิที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวแล้ว เรียกว่า ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นบริเวณรอยเชื่อมชนวาบด้วยทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่น เชิงเส้น และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาดำหนิแบบรอยร้าวครึ่งวงกลมบริเวณด้านล่างของราง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้แรงกดของล้อรถไฟ พบว่า ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นบริเวณตำหนิ เท่ากับขอบเขตค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของเหล็กกล้ารางรถไฟ เมื่อตำหนิเริ่มต้นวิกฤติมีขนาดประมาณ 2 มม. ซึ่งส่งผลให้รอยร้าวสามารถขยายตัวจากตำหนิเริ่มต้นนี้ได้ ผลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการด้านวิศวกรรมระบบราง โดยสามารถใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุง และปรับปรุงการเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ

คำสำคัญ: รางรถไฟ; การเชื่อมชนวาบ; ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น; การคำนวณเชิงตัวเลข

Abstract

The flaws within flash-butt welded joint of a rail may occur during welding and/or operation. They may cause the damage of the welded joint of a rail. The size of flaw that allows the fatigue crack to propagate is defined as the critical initial flaw size. In the present work, the critical initial flaw size of flash-butt welded joint of a rail was studied using the linear-elastic fracture mechanics and finite element method. A semi-circular crack at the bottom surface of rail foot (i.e., the region with the maximum bending stress from wheel load) was selected to represent the flaw. It was observed that the stress intensity factor range of flaw equals to the threshold stress intensity factor range of rail steel, when the flaw size is approximately 2 mm (i.e., the critical initial flaw size). At this critical initial

flaw, the propagation of fatigue crack is likely to occur. The finding can be beneficial to the railway engineering, and applied for the maintenance, and improvement of flash-butt welded joint.

Keywords: rail; flash-butt welding; critical initial flaw size; numerical calculation

1. บทนำ

การเชื่อมเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างทางรถไฟ และข้อมารถไฟ ความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีผลต่อความปลอดภัยของทางรถไฟโดยตรง ทางรถไฟสามารถเชื่อมต่อกันด้วยวิธีการเชื่อมที่หลากหลาย วิธีการเชื่อมรางรถไฟที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือการเชื่อมชนวบ (flash-butt welding) และการเชื่อมอะลูมิเนียม-เทอร์มิก (aluminothermic welding) โดยการเชื่อมชนวบใช้หลักการเดียวกันกับการเชื่อมไฟฟ้า รางรถไฟทั้งสองถูกยึดด้วยทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ปลายของรางรถไฟทั้งสองถูกวางห่างกันเล็กน้อย เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกปล่อยผ่านรางรถไฟ ส่งผลให้เกิดความร้อนจนปลายของรางรถไฟทั้งสองอยู่ในสถานะเกือบหลอมละลาย จากนั้นกดรางรถไฟทั้งสองเข้าหากัน แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนเกิดรอยเชื่อม (Lewis & Olofsson, 2009; BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant, 2007) ส่วนการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก คือการเชื่อมด้วยการหลอมโลหะ และเติมในช่องว่างระหว่างปลายของราง ภายใต้ความเค้นแบบวงรอบที่เกิดจากแรงกดของล้อรถไฟ (wheel load) ความเสียหายจากการล้า (fatigue) สามารถเกิดขึ้นได้กับรอยเชื่อมของรางรถไฟ การเชื่อมชนวบนิยมใช้ในการสร้างทางรถไฟ เนื่องจากมีอัตราการเกิดความเสียหายจากการล้าต่ำกว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก นอกจากนี้การเชื่อมชนวบใช้เวลาในการเชื่อมน้อยกว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก (Lewis & Olofsson, 2009)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของรอยเชื่อมจากการเชื่อมชนวบของรางรถไฟ และตำหนิที่เกิดขึ้น เช่น Cannon et al. (2003) ได้อธิบายสาเหตุของตำหนิที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟที่ตำแหน่งต่าง ๆ Ozakgul et al. (2015) ได้ทดสอบการล้าแบบการดัด 4 จุด (4 point bending fatigue test) กับรางรถไฟที่มีรอยเชื่อมชนวบ และนำอายุการล้า (fatigue life) ของรางรถไฟแบบ 49E1 (รางรถไฟที่มีน้ำหนัก 49 kg/m) และ 60E1 (รางรถไฟที่มีน้ำหนัก 60 kg/m) มาเปรียบเทียบกับอายุ

การล้าของรางรถไฟแบบ 60E1 ที่ได้จากทดสอบการล้าของ European Commission (D 4.6.1. The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails, 2009) Beretta et al. (2005) ได้ศึกษาการเกิดรอยร้าวล้า และการขยายตัวของรอยร้าวล้าในรางรถไฟ พบว่า รอยร้าวล้าเกิดขึ้นในรูปแบบการเฉือน (shearing mode หรือ mode II) และเปลี่ยนเป็นรูปแบบการเปิด (opening mode หรือ mode I) เมื่อรอยร้าวล้าขยายตัวยาวขึ้น Desimone and Beretta (2006) ได้จำลองการขยายตัวของรอยร้าวล้าในรางรถไฟ จากตำหนิเริ่มต้นในแนวแกนบริเวณรอยเชื่อม ด้วยขั้นตอนทดสอบรูปทรงกระบอกกลวง รับแรงบิดแบบวงรอบร่วมกับแรงในแนวแกนแบบวงรอบ (แรงดึง/แรงกด) พบว่า การขยายตัวของรอยร้าวล้า สอดคล้องกับการขยายตัวของรอยร้าวล้าจริงบริเวณรอยเชื่อมของรางรถไฟ โดยการขยายตัวของรอยร้าวล้าเกิดขึ้นในรูปแบบการเฉือน (shearing mode หรือ mode II) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นว่า รอยร้าวล้าสามารถเกิดจากตำหนิบริเวณรอยเชื่อมได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น ๆ โดยการขยายตัวของตำหนิขึ้นอยู่กับตำแหน่งของตำหนิ และภาระทางกล

ตำหนิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมชนวบของรางรถไฟ อาจเกิดระหว่างการเชื่อม และ/หรือ เกิดระหว่างการใช้งาน จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics) ตำหนิเหล่านี้เป็นอันตรายต่อรอยเชื่อมชนวบของรางรถไฟ โดยเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้น และเกิดความเสียหายจากการล้า เมื่อค่าพิสัยตัวประกอบ ความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range หรือ ΔK) บริเวณตำหนิสูงกว่าค่าขอบเขตพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (threshold stress intensity factor range หรือ ΔK_{th}) ของวัสดุรางรถไฟ (Suresh, 1998) ขนาดของตำหนิที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวล้า เรียกว่า ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น (critical initial flaw size) ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมชนวบของรางรถไฟ เมื่อรับโมเมนต์ดัดจากแรงกดของล้อรถไฟ (wheel load)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นบริเวณรอยเชื่อมขนาบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) โดยศึกษาตำหนิบริเวณด้านล่างของราง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้แรงกดของล้อรถไฟ โมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้แรงกดของล้อรถไฟถูกจำลองด้วยการดัด 4 จุดตามมาตรฐาน BS EN 14587 (BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant, 2007) ผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุง และปรับปรุงการเชื่อมขนาบของรางรถไฟ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ตำหนิรูปร่างครึ่งวงกลมบริเวณรอยเชื่อมขนาบของรางรถไฟ

Ozakgul et al. (2015) ได้ศึกษาการล้าของรางรถไฟแบบ 60E1 ที่ผ่านการเชื่อมขนาบและผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยการทดสอบการล้าแบบดัด 4 จุด ในการทดสอบ พิสัยความเค้นที่บริเวณตีนรางรถไฟ และอัตราส่วนความเค้นถูกควบคุมให้มีขนาดเป็น 190 MPa และ 0.1 ตามลำดับ รางรถไฟที่ใช้ทดสอบมีความยาวเป็น 2,000 มม. ระยะห่างระหว่างหัวกดด้านบนและแท่นรองรางรถไฟด้านล่างมีขนาดเป็น 240 มม. และ 1,800 มม. ตามลำดับ โดยรอยเชื่อมขนาบที่อยู่กึ่งกลางของรางรถไฟมีความกว้าง 20 มม. จากการทดสอบโดย Ozakgul et al. (2015) พบว่ารอยร้าวรูปร่างครึ่งวงกลม ได้ขยายตัวจากตำหนิเริ่มต้นบริเวณด้านล่างของตีนรางรถไฟ (rail foot) ซึ่งมีตำแหน่งและรูปร่างแสดงใน

รูปที่ 1

เนื่องจากการทดสอบการล้าเพื่อหาขนาดนาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นใช้เวลามาก และมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นตำแหน่งของตำหนิเริ่มต้นจากงานของ Ozakgul et al. (2015) ได้ถูกนำมาใช้ศึกษานาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งกำหนดให้เหล็กกล้ารางรถไฟและรอยเชื่อมขนาบมีคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Iwafuchi, 2004) เป็นดังนี้ โมดูลัสยืดหยุ่น (E) เป็น 210 GPa, ความเค้นคราก (σ_y) เป็น 460 MPa และ อัตราส่วนปัวซอง (ν) เป็น 0.3

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ ตำหนิเริ่มต้นถูกกำหนดให้เป็นรอยร้าวแบบครึ่งวงกลม (semi-circular crack) ที่ด้านล่างของตีนราง ดังแสดงใน

รูปที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองสามมิติ คือค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range หรือ ΔK) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของขอบรอยร้าว (crack front) โดยใช้โปรแกรม Abaqus/Standard (ABAQUS User's Manual, 2016) ΔK ที่คำนวณได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ ขอบเขตค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK_{th}) ของเหล็กกล้ารางรถไฟ โดยขนาดของรอยร้าวแบบครึ่งวงกลมที่ส่งผลให้ ΔK เท่ากับ ΔK_{th} คือขนาดนาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ซึ่งขั้นตอนการทำนายขนาดนาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นแสดงดัง

รูปที่ 2

ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นดังสมการต่อไปนี้ (ABAQUS User's Manual, 2016)

$$K_I = \sqrt{JE} \quad (1)$$

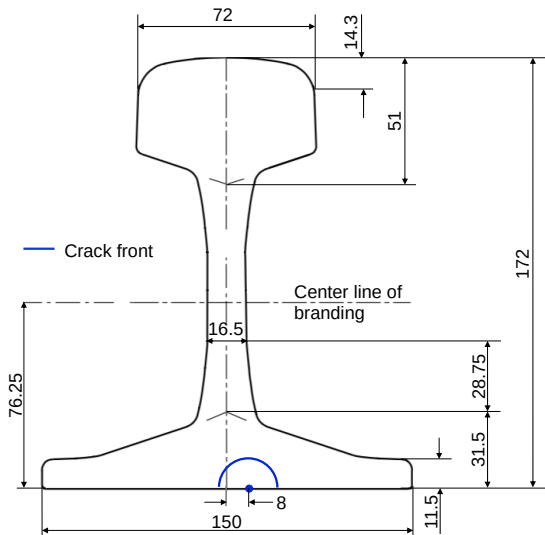
โดยที่ K_I คือ ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระที่ทำให้รอยร้าวเปิด, E' คือ โมดูลัส ในกรณีความเค้นระนาบ $E' = E$ ส่วนในกรณีความเค้นเครียดระนาบ $E' = E/(1-\nu^2)$ และ J คือ อัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียดเนื่องจากการสร้างผิวรอยร้าวใหม่ โดย J สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$J = \int_{A_t} \lambda(s)n \cdot H \cdot qdA \quad (2)$$

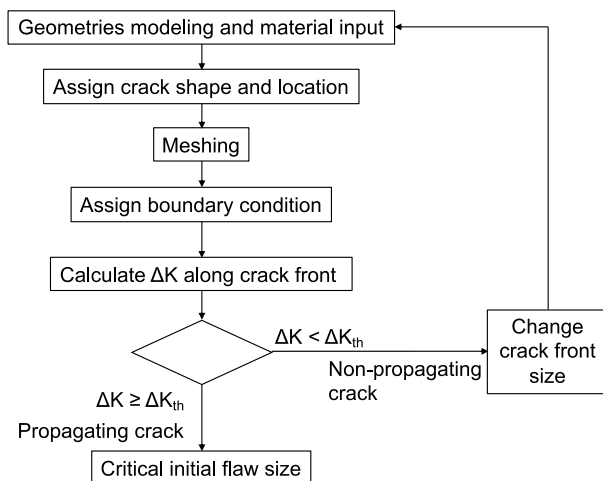
โดยที่ dA คือพื้นที่เอลิเมนต์ที่อยู่ในหลอด (tubular) ที่ปลายของรอยร้าว, A คือพื้นที่ทั้งหมดของหลอดที่ปลายของรอยร้าว (contour), $\lambda(s)$ คือ ระบุว่าผิวรอยร้าว, n คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวของ contour, q คือทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว และ H สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$H = WI - \sigma \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

โดยที่ W คือพลังงานความเครียดของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic material), s คือความเค้นที่เกิดขึ้นที่ contour และ $\frac{\partial u}{\partial x}$ คือตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปของขอบรอยร้าว



รูปที่ 1 รางรถไฟแบบ 60E1 และ ตำแหน่งบริเวณด้านล่างของดินรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมขวาง (Ozakgul et al., 2015) (หน่วย : มม.)



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น

ค่า K ที่ได้จากการคำนวณถูกนำมาคำนวณต่อเป็น ΔK โดยใช้สมการที่ (4)

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (4)$$

โดยที่ K_{min} คือค่า K ที่เกิดขึ้นบนรอยร้าวในขณะที่รางรถไฟรับภาระที่ต่ำที่สุด และที่ K_{max} คือค่า K ที่เกิดขึ้นบนรอยร้าวในขณะที่รางรถไฟรับภาระที่สูงที่สุด

ความต้านทานการล้ามีความสัมพันธ์แบบผกผันกับขนาดของตำหนิ จากงานวิจัยของ Kitagawa and Takahashi (1976) พบว่า เมื่อขนาดของตำหนิลดลง ความต้านทานการล้าเพิ่มขึ้น จนเมื่อตำหนิมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น (a_0) ค่า ΔK มีขนาดต่ำกว่า ΔK_{th} รอยร้าวล้ามีอัตราการขยายตัวที่ช้ามาก หรือหยุดขยายตัว ดังนั้นความต้านทานการล้าของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีตำหนิเล็กกว่า a_0 จึงใกล้เคียงกับขีดจำกัดความล้า (fatigue limit หรือ S_{se}) ในทางตรงกันข้าม ถ้าขนาดของตำหนิใหญ่กว่าขนาดของ a_0 ค่า ΔK ที่มีขนาดสูงกว่า ΔK_{th} ส่งผลให้รอยร้าวล้าขยายตัว และเกิดความเสียหายจากการล้าได้ ดังนั้นขนาดของ a_0 สามารถประมาณได้จาก (Suresh, 1998)

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{F \Delta \sigma_e} \right)^2 \quad (5)$$

โดย F คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (geometry function)

จากงานวิจัยของ Maya-Johnson et al. (2015) พบว่า ΔK_{th} ของเหล็กกล้ารางรถไฟมีค่าเป็น $11 \text{ MPa.m}^{1/2}$ และ Iwafuchi et al. (2004) พบว่า S_{se} ของเหล็กกล้ารางรถไฟมีค่าเป็น 450 MPa ถ้ากำหนดให้ $F = 1$ พบว่า ขนาด a_0 เป็น 0.2 มม. เนื่องจากรางรถไฟมีรูปร่างซับซ้อน และมีรอยร้าวที่ผิวด้านล่างของดินราง ($F \neq 1$) ขนาดของ a_0 จึงไม่สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักโดยตรง ดังนั้น รอยร้าวรูปครึ่งวงกลมมีความลึก 0.5 มม. ถูกกำหนดให้เป็นรอยร้าวเริ่มต้นรูปครึ่งวงกลม (a_0) เพื่อทำนายขนาดของ a_0 ของรางรถไฟ 60E1 ที่ผ่านการเชื่อมขวาง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3 โดยเอลิเมนต์บริเวณแนวรอยร้าวเป็นแบบปริซึมหน้าตัดสามเหลี่ยม 20 โหนด ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงร่างของเอลิเมนต์ลูกบาศก์ 20 โหนด (20-node quadratic brick, reduced integration, C3D20R) เพื่อให้สามารถคำนวณความเค้นของขอบรอยร้าวได้แม่นยำยิ่งขึ้น และเอลิเมนต์บริเวณตัวรางรถไฟเป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม 10 โหนด (10 node tetrahedral element, C3D10) ภาระที่ใช้ในการคำนวณ และเงื่อนไขขอบเขต ถูกกำหนดตามการทดสอบการล้าของ Ozakgul et al. (2015) โดยกำหนดให้มีการคำนวณทั้งหมด 50 ระดับ จากแรงเป็นศูนย์ถึงแรงสูงสุด

จากการศึกษาผลกระทบของจำนวนเอลิเมนต์ ต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้เข้าสู่ที่ 134,486, 222,631 และ 431,521 เอลิเมนต์ เมื่อนำผลลัพธ์จากแบบจำลอง 134,486 เอลิเมนต์ เทียบกับแบบจำลอง 431,521 เอลิเมนต์ พบว่า ความแตกต่างของผลลัพธ์น้อยกว่า 5% เมื่อคำนวณโดยใช้ คอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการ Intel(R) Xeon (R) CPU E5-2620 0 @ 2.00 GHz 2.00 GHz (2 processors) และมีหน่วยความจำหลัก (RAM) 128GB พบว่า แบบจำลองที่มีจำนวนเอลิเมนต์เป็น 134,486, 222,631 และ 431,521 เอลิเมนต์ ใช้เวลาในการคำนวณ 8, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ ดังนั้น จึงเลือกใช้แบบจำลองที่มีเอลิเมนต์จำนวน 134,486 เอลิเมนต์

2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

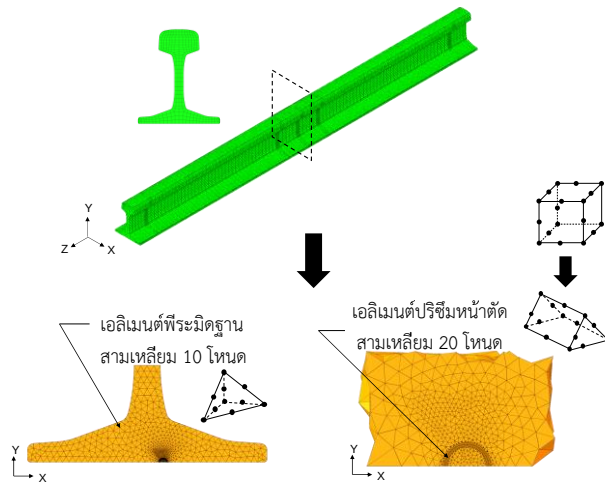
เนื่องจากข้อจำกัดของการหาราง 60E1 เพื่อใช้ในงานวิจัย จึงใช้รางรถไฟที่สามารถหาได้ในประเทศไทย คือราง 54E1 (รางรถไฟที่มีน้ำหนัก 54 kg/m) มาทำการทดสอบ โดยรางทั้งสองมีรูปร่างที่คล้ายกัน โดยราง 54E1 มีความสูงน้อยกว่าราง 60E1 1.3 ซม. ดังนั้น ราง 54E1 จึงถูกนำมาทดสอบการดัด 4 จุด และวัดความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ผลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของราง 54E1

รางรถไฟ 54E1 (BS EN 13674-1: Railway applications - Track - Vignole railway rails 46 kg/m and above, 2002) ที่ผ่านการเชื่อมชนวาบและไม่มีตำหนิ ถูกทดสอบการดัด 4 จุด (4 point bending test) ตามมาตรฐาน BS EN 14587 (BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant, 2007) ดังรูปที่ 4 การทดสอบการดัด 4 จุด ทำด้วยเครื่องทดสอบการล้าแบบเซอร์โวไฮดรอลิก (MTS: 244.22 with 500-kN load cell) แรกกดแบบสถิตมีขนาดสูงสุดเป็น 240 kN อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทดสอบเป็น 30 ± 2 °C และ 60 ± 5 % ตามลำดับ ความเครียดตามแนวยาวของรางถูกวัดด้วยเกจวัดความเครียด ที่มีระยะเกจ 3 มม. (strain gage, TML: FRA-3-11) ที่กึ่งกลางของรอยเชื่อม โดยตำแหน่งของเกจวัดความเครียด (e_A , e_B , e_C , e_D) แสดงในรูปที่ 4 ความเครียดที่วัดได้ ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของรางรถไฟ 54E1 ที่ไม่มีตำหนิ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

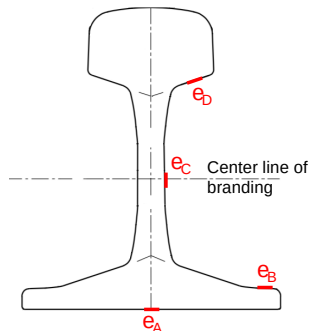
2.4 การกระจายของความเค้นและความเครียด

การกระจายของความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อมชนวาบเมื่อรับแรงกดสูงสุด แสดงดัง

รูปที่ 5 พบว่า ความเค้นบริเวณด้านบนของแกนสมดุล (neutral axis) หรือบริเวณหัวรางเป็นความเค้นอัด โดยบริเวณหัวรางมีค่าความเค้นอัดเป็น -769.21 MPa ความเค้นอัดไม่ส่งผลต่อการขยายตัวของรอยร้าว เนื่องจากความเค้นอัดทำให้รอยร้าวปิด ในขณะที่ความเค้นบริเวณด้านล่างของแกนสมดุล (neutral axis) หรือบริเวณตีนราง เป็นความเค้นดึง 150 MPa ความเค้นดึงทำให้รอยร้าวเปิด ดังนั้นบริเวณความเค้นดึงเป็นบริเวณที่รางมีโอกาสเสียหายจากการเกิดและขยายตัวของรอยร้าวได้ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเสียหายของรางรถไฟที่แสดงในงานวิจัยของ Ozakgul et al. (2015) ที่รอยร้าวได้ขยายตัวจากตำหนิที่บริเวณตีนรางรถไฟ และขยายตัวไปยังหัวรางรถไฟ



รูปที่ 3 แบบจำลองการทดสอบการดัด 4 จุด ของรางรถไฟ 60E1 ที่ผ่าน การเชื่อมชนวาบ



รูปที่ 4 การทดสอบการดัด 4 จุด ของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อม ชนวาบ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเครียดตาม แนวแกนของราง แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า ความเครียดเพิ่มขึ้นตาม แรงที่กระทำ โดยแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น ความเครียดตั้ง เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของแกนสมดูล (e_A และ e_B) หรือบริเวณ

ตีนราง (rail foot) ในขณะที่ยังบริเวณด้านบนของแกนสมดูล (e_D) หรือบริเวณหัวราง (rail head) เกิดความเครียดอัด และใน บริเวณแกนสมดูล (e_C) หรือบริเวณเอวราง (rail web) พบว่า ความเครียดเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อนำความเครียดที่ได้จากการคำนวณ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับความเครียดจาก การวัดด้วยเกจวัดความเครียด พบว่า มีความสอดคล้องกัน โดย ความแตกต่างของความเครียดสูงสุดที่ตำแหน่ง A ระหว่างการวัด ด้วยเกจวัดความเครียด และการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ เป็น 1.15% ดังนั้น การคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ มีความถูกต้อง และสามารถใช้ในการคำนวณความเค้น และความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนรางรถไฟได้

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น

รอยร้าวครึ่งวงกลมขนาดต่าง ๆ ถูกใช้ในการทำนายขนาด วิกฤติของตำหนิเริ่มต้น โดย DK ถูกคำนวณที่มุมต่าง ๆ (q) ของ รอยร้าวครึ่งวงกลม แสดงดังรูปที่ 7 ขนาดของรอยร้าว ครึ่ง วงกลมถูกจำกัดด้วยขนาดและรูปร่างของตีนราง โดยรัศมีของ รอยร้าวครึ่งวงกลมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถขยายตัวไปแต่ละผิว ด้านบนของตีนรางรถไฟเป็น $r_c = 27$ มม. ดังนั้นขนาดรอยร้าว ครึ่งวงกลมกำหนดเป็น a/r_c ปากของรอยร้าว (crack mount) วางอยู่บนผิวด้านล่างของตีนราง โดยมีขอบรอยร้าว (crack front) อยู่ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° ในขณะที่รอยร้าวมีความลึกสูงสุด ที่ $q = 90^\circ$

จากการที่รางรถไฟรับความเค้นดัดสูงสุดที่บริเวณผิวด้านล่างของตีนราง DK ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° จึงมีขนาดสูงกว่า DK ที่ $q = 90^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยความแตกต่างระหว่าง DK ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° กับ DK ที่ $q = 90^\circ$ เพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยร้าว เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง DK ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° พบว่า DK ที่ $q = 0^\circ$ มีค่ามากกว่า DK ที่ $q = 180^\circ$ เพียง 0.7 % เนื่องจากที่ $\theta = 0^\circ$ มีพื้นที่ในการขยายตัวของรอยรำน้อยกว่าที่ตำแหน่ง $\theta = 180^\circ$ ทำให้รอยร้าวที่ $\theta = 0^\circ$ มีความรุนแรงมากกว่า ดังนั้น DK ที่ 0° จึงถูกใช้ในการเปรียบเทียบความรุนแรงกับตำแหน่งอื่น ๆ ของรอยร้าว

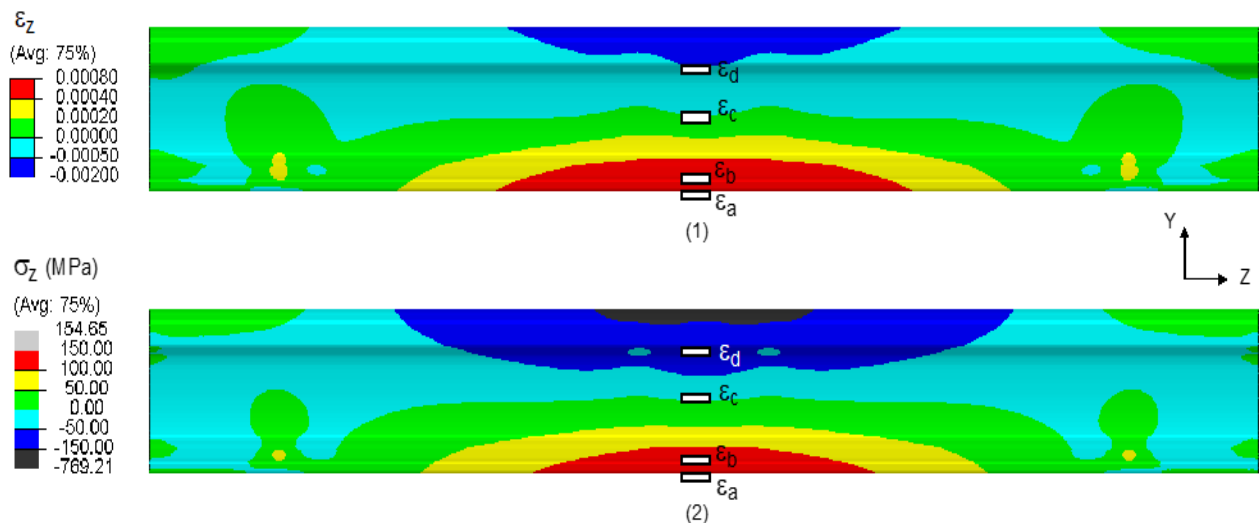
จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ระบุว่าขนาดของรอยร้าวที่สามารถเกิดการขยายตัวได้จากภาวะแบบวงรอบ คือรอยร้าวที่มี DK เท่ากับ ΔK_{th} โดยผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า รอย

ร้าวขนาด 2 มม. หรือ $a/r_c = 0.07$ ส่งผลให้เกิด σ_K มากกว่า ΔK_{th} ที่ $\theta = 0^\circ$ จึงสามารถสรุปได้ว่า รอยร้าวสามารถเกิดการขยายตัวได้ เมื่อขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นเป็น 2 มม. ซึ่งรอยร้าวขนาดดังกล่าวเริ่มขยายตัวที่ตำแหน่ง $\theta = 0^\circ$ ก่อนตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากในตำแหน่งอื่น ๆ ยังคงมีค่า σ_K น้อยกว่า ΔK_{th} ดังที่แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_K กับขนาดรอยร้าว a/r_c ที่ $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 90^\circ$

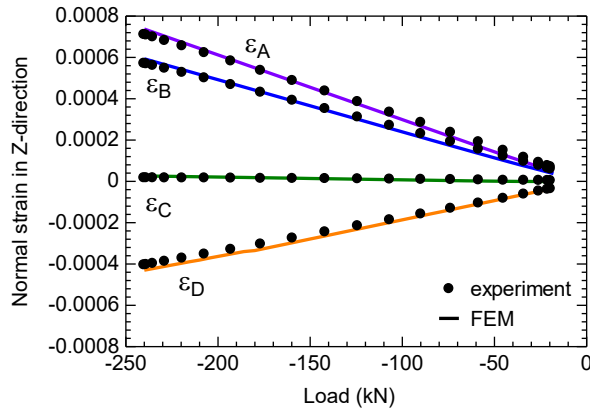
3.2 ขนาดของบริเวณพลาสติกรอบตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ

เนื่องจากความเค้นบริเวณตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ (critical initial flaw) มีขนาดสูง และลดลงตามระยะห่างจากตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ ในบริเวณที่ความเค้นมีขนาดสูงกว่าความเค้นครากการเปลี่ยนแปลงขนาดเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ

พลาสติก ซึ่งเรียกว่า บริเวณพลาสติก (plastic zone) ถ้าขนาดของบริเวณพลาสติกเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดของตำหนิ และขนาดของรางรถไฟ ค่า σ_K ตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics) สามารถใช้อธิบายความรุนแรงของตำหนิในรอยเชื่อมขนาบของรางได้ ดังนั้น ความเค้นวอนมิส (von Mises stress หรือ σ_v) ที่บริเวณตำหนิเริ่มต้นวิกฤติขนาด 2 มม. ถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดัง รูปที่ 9 บริเวณพลาสติกที่ปากรอยร้าว ($q = 0^\circ$ และ 180°) มีขนาดใหญ่กว่า บริเวณพลาสติกที่ความลึกสูงสุด ($q = 90^\circ$) บริเวณพลาสติกที่ปากรอยร้าวมีขนาด 0.31 มม. ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ และขนาดของราง

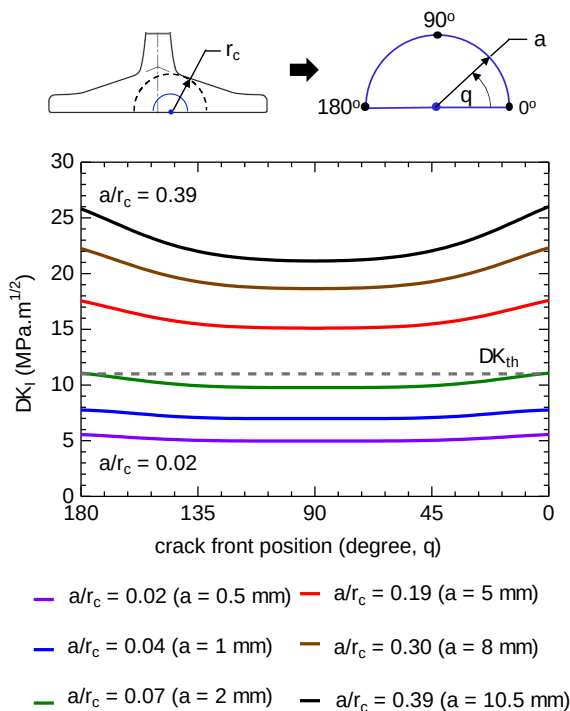


รูปที่ 5 การกระจายของ (1) ความเครียดและ (2) ความเค้นตามแนวแกนของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อมขนาบ เมื่อรับแรงสูงสุด โดยสี่เหลี่ยมสีขาวคือตำแหน่งของเกจวัดความเครียด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเครียดตามแนวแกนของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อมขวาง

ดังนั้นค่า DK ตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics) สามารถใช้อธิบายความรุนแรงของตำหนิ และสามารถใช้ทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขวางของรางได้



รูปที่ 7 ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ขอบของรอยร้าวครึ่งวงกลมขนาดต่าง ๆ บนรางรถไฟ 60E1

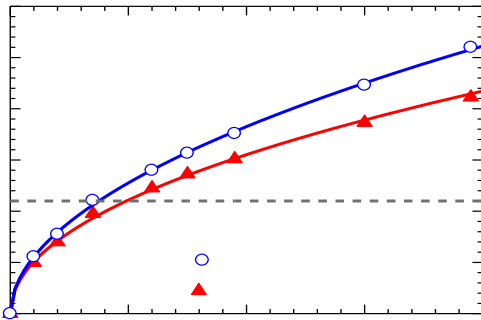
4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขวางของรางรถไฟ ด้วยทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยขนาดของตำหนิ เป็นขนาดวิกฤติของตำหนิ เริ่มต้น เมื่อ $DK \geq DK_{th}$ ค่า DK ของตำหนิที่มีลักษณะแบบรอยร้าวครึ่งวงกลมถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

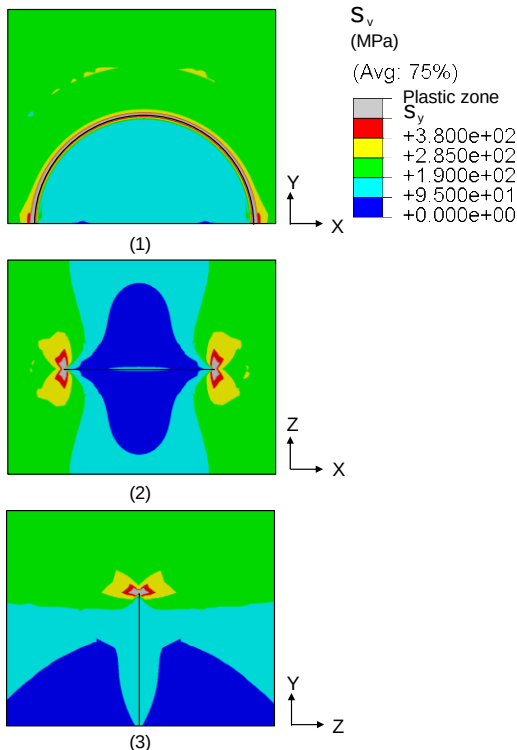
□ ความถูกต้องของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกยืนยันด้วยการนำความเครียดที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับความเครียดบนรางระหว่างการทดสอบการดัด 4 จุด ผลทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ดังนั้น การคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้คำนวณความเค้น และ DK บริเวณตำหนิในรอยเชื่อมขวางของรางรถไฟได้

□ ค่า DK ที่ผิวด้านล่างของตีนรางมีขนาดสูงกว่า DK ที่ความลึกสูงสุด เนื่องจากการที่รางรับความเค้นดัดสูงสุดที่บริเวณผิวด้านล่างของตีนราง ความแตกต่างระหว่าง DK ที่ผิวด้านล่างของตีนรางและที่ความลึกสูงสุด เพิ่มมากขึ้นตามขนาดของรอยร้าว ค่า DK ที่บริเวณผิวด้านล่างของตีนราง $\geq DK_{th}$ เมื่อตำหนิเริ่มต้นวิกฤติมีขนาดเป็น 2 มม. ซึ่งส่งผลให้รอยร้าวสามารถขยายตัวจากตำหนิเริ่มต้นนี้ได้

□ บริเวณพลาสติกที่ตำหนิเริ่มต้นวิกฤติมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ และขนาดของรางอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น สมมติฐานกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นเป็นจริง และ DK สามารถใช้อธิบายความรุนแรงของตำหนิ และสามารถใช้ทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขวางของรางได้ ผลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการด้านวิศวกรรมระบบราง โดยสามารถใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุงและปรับปรุงการเชื่อมขวางของรางรถไฟ



รูปที่ 8 ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวบนรางรถไฟ 60E1



รูปที่ 9 การกระจายของความเค้นวอนมีสบนตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ (1) ด้านหน้าของรอยร้าว (2) ปากรอยร้าว และ (3) ภาพตัดของรอยร้าว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก (1) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (2) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (3) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ทุนวิจัย และทุนการศึกษาระดับปริญญาโท)

6. เอกสารอ้างอิง

- ABAQUS User's Manual. (2016). *Abaqus/Standard*. ABAQUS.
- Beretta, S., Boniardi, M., Carboni, M., & Desimone, H. (2005). Mode II fatigue failures at rail butt-welds. *Engineering Failure Analysis*, 12(1), 157-165.
- BS EN 13674-1: Railway applications - Track - Vignole railway rails 46 kg/m and above. (2002). In British-Adopted European Standard
- BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant. (2007). In British-Adopted European Standard.
- Cannon, D. F., Edel, K. O., Grassie, S. L., & Sawley, K. (2003). Rail defects: an overview. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26(10), 865-886.
- D 4.6.1. The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails. (2009). International Union of Railways (UIC).
- Desimone, H., & Beretta, S. (2006). Mechanisms of mixed mode fatigue crack propagation at rail butt-welds. *International journal of fatigue*, 28(5-6), 635-642.
- Iwafuchi, K., Satoh, Y., Toi, Y., & Hirose, S. (2004). Fatigue property analysis of rail steel based on damage mechanics. *Quarterly Report of RTRI*, 45, 203-209.
- Kitagawa, H., & Takahashi, S. (1976). *Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage* [Paper presentation]. Mechanical Behavior of Materials, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- Lewis, R. & Olofsson, U. (2009). *Wheel-rail interface handbook*. Elsevier.
- Maya-Johnson, S., Ramirez, A. J., & Toro, A. (2015). Fatigue crack growth rate of two pearlitic rail steels. *Engineering fracture mechanics*, 138, 63-72.
- Ozakgul, K., Piroglu, F., & Caglayan, O. (2015). An experimental investigation on flash butt welded rails. *Engineering Failure Analysis*, 57, 21-30.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials*. Cambridge university press.