

## ผลกระทบของความเค้นตกค้างต่อขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ในรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ

### Effect of residual stress on the critical initial flaw size of flash-butt welded rail

กชพร ภาตสูงเนิน<sup>1\*</sup>, นิตกร นรภัยพิพากษา<sup>2</sup>, อาณัติ หาทรัพย์<sup>3</sup>

และ ชาวสวน กาญจน์มัย<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิศวกรรมและสมรรถนะของวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

<sup>2</sup>บริษัท นิตกร รีเสิร์ช พาร์ทเนอร์ จำกัด อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

<sup>3</sup>ศูนย์ทดสอบมาตรฐานระบบขนส่งทางราง สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

\*ติดต่อ: k.thadsoongnoen@gmail.com

#### บทคัดย่อ

การเชื่อมต่อรางรถไฟด้วยการเชื่อมชนวาบ เป็นการเชื่อมความต้านทาน ผลกระทบของการเชื่อมชนวาบที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือ ความเค้นตกค้างที่บริเวณรอยเชื่อม โดยความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น ส่งผลกระทบบต่อ ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น และขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของความเค้นตกค้าง ต่อขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ซึ่งตำหนิเริ่มต้นสามารถขยายตัวได้ และส่งผลให้เกิดการแตกหักในรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ ผลที่ได้สามารถนำมาออกแบบ ประเมิน และปรับปรุงการเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ

**คำหลัก:** การเชื่อมชนวาบ, รางรถไฟ, ความเค้นตกค้าง, การล้า

#### Abstract

Nowadays, common rail joint is flash-butt welding, which is a type of electric resistance welding. However, the inevitable impact from flash-butt welding is residual stress, which influences the critical initial flaw size within rail joint. In this work, the ranges of stress intensity factors with the influence of residual stress were numerically calculated, and applied for the prediction of the critical fatigue crack size. Finding can be used for the design, evaluation, and improvement of rail joint.

**Keywords:** flash-butt welding, rail, residual stress, fatigue crack

#### 1. บทนำ

การคมนาคมด้วยรถไฟเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถบรรทุกสินค้าและผู้โดยสารได้จำนวนมาก ในหนึ่งเที่ยวการเดินทาง รางรถไฟมีระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร จำเป็นที่จะต้องมีการเชื่อมต่อรางรถไฟ เนื่องจากราง

รถไฟ 1 ราง มีความยาวประมาณ 12 - 25 เมตร นอกจากนี้ การเชื่อมต่อรางรถไฟยังใช้ในงานซ่อมบำรุงรางรถไฟที่ชำรุดอีกด้วย

วิธีการเชื่อมรางรถไฟที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ การเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก (aluminothermic welding)

## AMM – 009

และ การเชื่อมชนวาบ (flash-butt welding) การเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก คือ การเชื่อมที่ใช้การหลอมโลหะ เพื่อเติมในช่องว่างระหว่างปลายของราง ที่ต้องการเชื่อม ส่วนการเชื่อมชนวาบ ใช้หลักการเดียวกันกับการเชื่อมไฟฟ้า โดยรางรถไฟทั้งสองถูกยึดด้วยทองแดง ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า โดยปลายของรางรถไฟทั้งสองถูกวางห่างกันเล็กน้อย เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงผ่านรางรถไฟ ส่งผลให้เกิดความร้อนจนปลายของรางรถไฟทั้งสองอยู่ในสถานะเกือบหลอมละลาย จากนั้นกดปลายรางรถไฟทั้งสองเข้าหากัน แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนเกิดรอยเชื่อม [1, 2] การเชื่อมชนวาบมีอัตราการเกิดความเสียหายจากการเชื่อมต่ำกว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก นอกจากนี้ การเชื่อมชนวาบใช้เวลาในการเชื่อมน้อยกว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก [1]

ปัจจุบันได้มีการศึกษา ความสัมพันธ์ของรอยเชื่อมจากการเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ และตำหนิที่เกิดขึ้น เช่น Cannon และคณะ [3] อธิบายตำหนิที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ และตำแหน่งการเกิดตำหนิ นั้น ๆ Ozakgul และคณะ [4] ได้ทดสอบการล้าแบบการดัด 4 จุด (4 point bending fatigue test) กับรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมชนวาบ และนำอายุการล้า (fatigue life) ของรางรถไฟแบบ 49E1 และ 60E1 มาเปรียบเทียบกับ อายุการล้าของรางรถไฟแบบ 60E1 ที่ได้จากทดสอบการล้าของ European Commission [5]

เนื่องจากกระบวนการเชื่อมชนวาบ ทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนของเนื้อวัสดุ ส่งผลให้เกิดความเค้นขึ้น ซึ่งคงอยู่แม้ว่ากระบวนการเชื่อมนั้นจะสิ้นสุดลงแล้ว เรียกว่า ความเค้นตกค้าง (residual stress) ดังนั้นความเค้นตกค้างจากการเชื่อมชนวาบ จึงเป็นผลกระทบที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ Skyttebol และคณะ [6] ได้ศึกษาผลกระทบของความเค้นตกค้าง (residual stress) ต่อการขยายตัวของรอยร้าวล้าบริเวณรอยเชื่อม โดยพบว่าความเค้นตกค้างที่คำนวณจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับความเค้นตกค้างจากการวัดด้วยวิธีการ

hole-drilling โดยที่บริเวณหัวรางมีความเค้นตกค้างแบบดึงสูง จึงทำการพิจารณาการเกิดตำหนิที่บริเวณหัวราง พบว่ารอยร้าวที่ผิวอันตรายกว่ารอยร้าวใต้ผิว โดยรอยร้าวที่ผิวขนาด 5-10 ตารางมิลลิเมตร ส่งผลให้เกิดความเสียหายจากการล้าได้ในเวลาไม่กี่ปี Qiang [7] และคณะ พบว่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมชนวาบ มีผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าว (stress intensity factor,  $K$ ) ดังนั้นความเค้นตกค้างจึงมีอิทธิพลต่อขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ที่สามารถขยายต่อได้ อย่างไรก็ตาม ตำหนิของรอยเชื่อมรางภายใต้โมเมนต์ดัดจากขบวนรถไฟ เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของราง [5] ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการวิจัย ที่อธิบายผลกระทบของความเค้นตกค้างบริเวณรอยเชื่อมที่ด้านล่างของราง ต่อการล้าของรอยเชื่อมราง

ตำหนิที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนทางวิศวกรรม อาจเกิดจากการกัดกร่อน หรือการขึ้นรูป ซึ่งตำหนิสามารถขยายตัวภายใต้ภาระแบบวงรอบ (cyclic load) และเป็นอันตรายต่อชิ้นส่วนทางวิศวกรรม เมื่อค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) บริเวณตำหนิสูงกว่าค่าขอบเขตพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K_{th}$ ) ของวัสดุ [8] โดยขนาดของตำหนิที่จะทำให้เกิดการขยายต่อได้ เรียกว่า ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น (critical initial flaw size) ดังนั้นงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเค้นตกค้างต่อขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ในบริเวณรอยเชื่อมชนวาบที่ด้านล่างของราง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ ประเมิน และปรับปรุงการเชื่อมต่อรางรถไฟต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

การทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบ่งเป็นสองกรณี คือ พิจารณาความเค้นตกค้าง และไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง สมบัติของเหล็กกล้ารางรถไฟ แสดงในหัวข้อ 2.1,

## AMM – 009

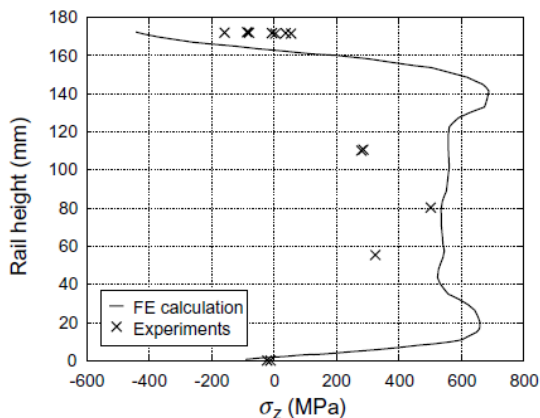
รูปแบบของความเค้นตกค้างบนรอยเชื่อมขนาบของรางรถไฟ แสดงในหัวข้อ 2.2, การทำไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงในหัวข้อ 2.3, การกำหนดความเค้นตกค้าง แสดงในหัวข้อ 2.4 และการทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น แสดงในหัวข้อ 2.5

### 2.1 เหล็กกล้ารางรถไฟ

รางรถไฟที่ใช้ในการเชื่อมขนาบ เป็นราง 60E1 [9] การเชื่อมแบบขนาบทำตามมาตรฐาน BS EN 14587 [10] รอยเชื่อมที่ได้มีความกว้าง  $20 \pm 2$  มม มอดูลัสยืดหยุ่น (E) เป็น 210 GPa และ อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) เป็น 0.3 จากงานวิจัยของ Maya-Johnson และคณะ [11] พบว่า ขอบเขตค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K_{th}$ ) ของเหล็กกล้ารางรถไฟมีค่าเป็น  $11 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

### 2.2 ความเค้นตกค้าง

จากงานวิจัยของ Skyttebol และคณะ [6] พบว่า ความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวของหัวราง เป็นความเค้นอัดสูงสุด ซึ่งมีขนาดประมาณ 440 MPa และ ความเค้นตกค้างที่บริเวณด้านล่างของตีนราง เป็นความเค้นอัด มีขนาดประมาณ 100 MPa โดยการกระจายความเค้นตกค้าง แสดงดังรูปที่ 1

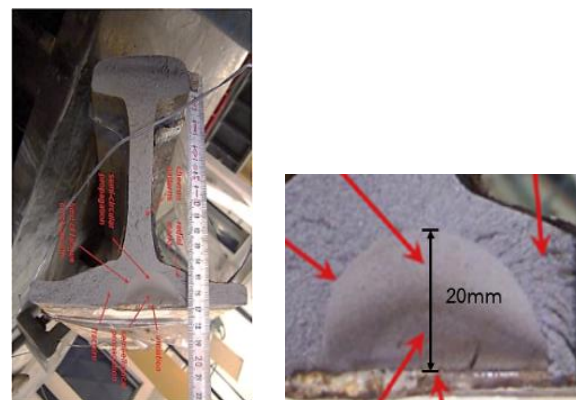


รูปที่ 1 การกระจายความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมในทิศทางตามความยาวของรางรถไฟ [6]

### 2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Ozakgul และคณะ [4] ได้ศึกษาการเชื่อมขนาบของรางรถไฟแบบ 60E1 ที่ผ่านการเชื่อมขนาบและผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยการทดสอบการล้าแบบตัด 4 จุด โดยควบคุมความเค้นที่ตีนรางให้มีขนาด 19 ถึง 190 MPa รางรถไฟมีความยาว 2000 มม. หัวกดและแท่นรองรางรถไฟถูกวางห่างกัน 240 มม. และ 1000 มม. ตามลำดับ รางรถไฟนี้เกิดความเสียหาย เมื่อรับภาระแบบวงรอบ จำนวน 2,144,180 รอบ และมีขนาดวิกฤติของรอยร้าวสุดท้ายก่อนเกิดการแตกหักขนาดประมาณ 20 มม. แสดงในรูปที่ 2

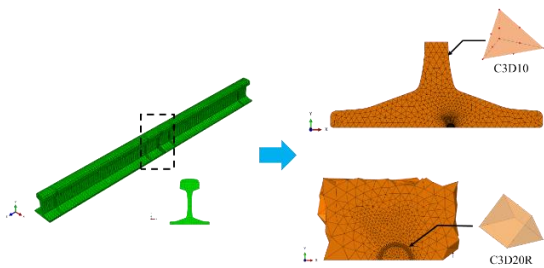
ดังนั้นความเค้นบนรอยเชื่อมถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ ด้วยโปรแกรม Abaqus/Standard [12] แบบจำลองตำหนิของรอยเชื่อมขนาบของราง ถูกกำหนดให้เป็นรอยร้าวแบบครึ่งวงกลม (semi-circular crack) ที่ด้านล่างของตีนราง ตามงานวิจัยของ Ozakgul และคณะ [4] แสดงในรูปที่ 3 โดยแบบจำลองนี้ ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงแล้ว รายละเอียดของแบบจำลอง แสดงในงานวิจัยของ กชพรและชีวิน [13]



รูปที่ 2 ความเสียหายจากการล้าบริเวณตีนราง 60E1 ที่ผ่านการเชื่อมขนาบ [4]

เอลิเมนต์บริเวณแนวรอยร้าวเป็นแบบ 20-node quadratic brick, reduced integration (C3D20R) และ

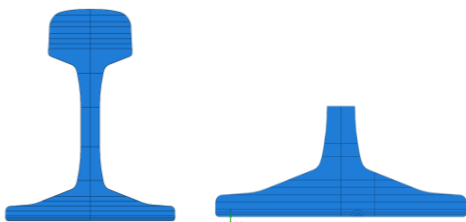
เอลิเมนต์บริเวณตัวรางรถไฟเป็นแบบ 10 node tetrahedral element (C3D10) ภาระที่ใช้ในการคำนวณและเงื่อนไขขอบเขต ถูกกำหนดตามการทดสอบการล้าของ Ozakgul และคณะ [4] เพื่อลดผลกระทบของขนาดเอลิเมนต์ต่อการคำนวณตัวประกอบความเข้มของความเค้น ขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ถูกปรับจนกระทั่ง ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่แนวรอยร้าวไม่ได้รับผลกระทบจากขนาดของเอลิเมนต์ โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง ประมาณ 130,000 ชิ้น



รูปที่ 3 แบบจำลองของรอยเชื่อมชนวาบของราง 60E1 ที่มีรอยร้าวครึ่งวงกลมที่ด้านล่าง [12]

## 2.4 การกำหนดความเค้นตกค้าง

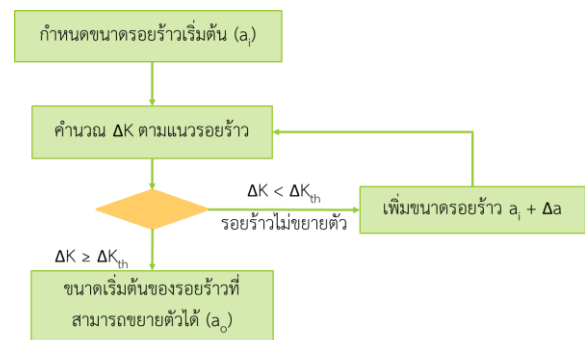
การกำหนดความเค้นตกค้างลงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทำได้ด้วยวิธี superposition ตามงานวิจัยของ Dong และคณะ [14] ซึ่งเป็นการกำหนดขนาดและทิศทางของความเค้นตกค้าง ลงไปในตำแหน่งที่สอดคล้องกับการกระจายความเค้นตกค้างในรูปที่ 1 บริเวณการกำหนดค่าความเค้นตกค้างถูกแบ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 และค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) บริเวณแนวรอยร้าว ถูกคำนวณโดยพิจารณาผลกระทบของความเค้นตกค้าง [15]



รูปที่ 4 บริเวณกำหนดความเค้นตกค้าง

## 2.5 การทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น

ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ที่สามารถขยายตัวได้ของรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมชนวาบ ถูกทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่น ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K_I$ ) ของรอยร้าวครึ่งวงกลม ถูกมาเทียบกับ  $\Delta K_{th}$  ของเหล็กกล้ารางรถไฟ ขนาดของรอยร้าวที่  $\Delta K_I \geq \Delta K_{th}$  คือ ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น (critical initial flaw size,  $a_0$ ) โดยขั้นตอนการทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการคำนวณขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น

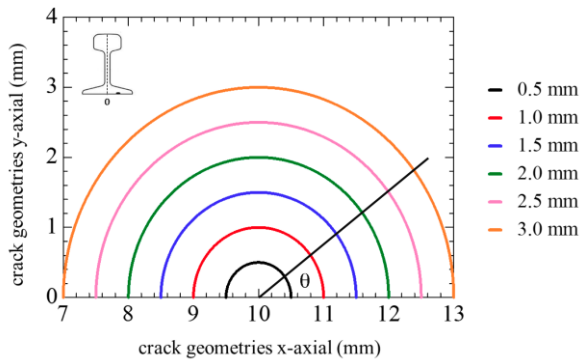
## 3. ผลและการวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ของรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมชนวาบ แบ่งเป็นสองกรณี คือ พิจารณาความเค้นตกค้าง และไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

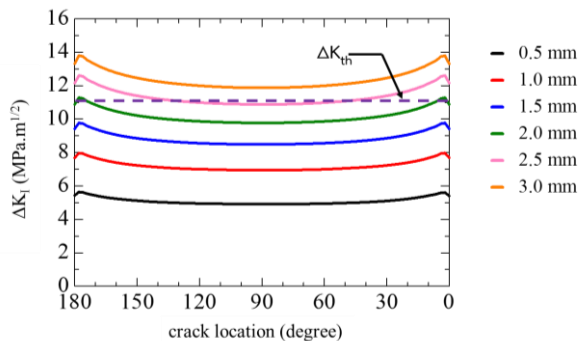
### 3.1 ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น เมื่อไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง

รอยร้าวครึ่งวงกลมขนาดต่าง ๆ (รูปที่ 6) ถูกใช้ในการทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น โดยค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K_I$ ) ถูกคำนวณที่มุมต่าง ๆ ( $\theta$ ) ของรอยร้าวครึ่งวงกลม โดยไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งพบว่า เมื่อสมมติให้รอยร้าวครึ่งวงกลมมีขนาด 3 มม. ส่งผลให้  $\Delta K_I \geq \Delta K_{th}$  ดังนั้น ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ( $a_0$ ) คือ 3 มม. เมื่อไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง

## AMM – 009



รูปที่ 6 แสดงรูปร่างและขนาดของรอยร้าว



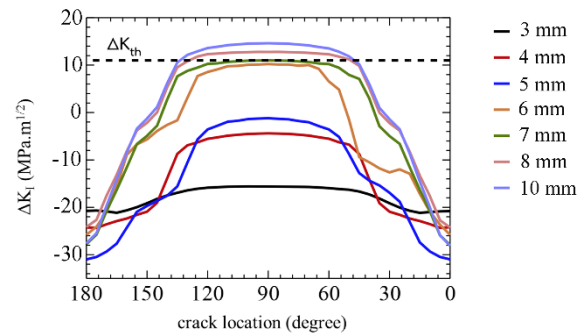
รูปที่ 7 ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าว เมื่อไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง

### 3.2 ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น เมื่อพิจารณาความเค้นตกค้าง

เนื่องจากความเค้นตกค้างที่บริเวณด้านล่างของตีนราง เป็นความเค้นอัด (รูปที่ 1) ถ้าความเค้นดึงแบบวงรอบที่มากกระทำกับรอยร้าวต่ำกว่า ความเค้นตกค้างอัด ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นจะติดลบ หรือพื้นผิวรอยร้าวไม่เปิด ซึ่งส่งผลให้รอยร้าวไม่ขยายตัว

ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K_I$ ) ถูกคำนวณที่มุมต่าง ๆ ( $\theta$ ) ของรอยร้าวครึ่งวงกลม ที่บริเวณผิวด้านล่างของตีนราง โดยพิจารณาความเค้นตกค้าง แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวครึ่งวงกลมขนาดน้อยกว่า 7 มม. เป็นลบ จากผลกระทบจากความเค้นตกค้างอัดที่บริเวณตีนราง อย่างไรก็ตาม เมื่อสมมุติให้รอยร้าวครึ่งวงกลมมีขนาดลึกมากกว่า 7 มม. ความเค้นตกค้างที่

บริเวณ 7 มม. จากด้านล่างของตีนรางเป็นความเค้นดึง (รูปที่ 1) ประกอบกับความเค้นบริเวณรอยร้าวเพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยร้าว ส่งผลให้  $\Delta K_I \geq \Delta K_{th}$  ดังนั้นขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ( $a_0$ ) ภายใต้ผลกระทบจากความเค้นตกค้างคือ 7 มม.



รูปที่ 8 ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าว เมื่อไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง

## 4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ของรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมชนวบ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าถ้าความเค้นดึงแบบวงรอบที่มากกระทำกับรอยร้าวต่ำกว่าความเค้นตกค้างอัด ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นจะติดลบ หรือพื้นผิวรอยร้าวไม่เปิด ซึ่งส่งผลให้รอยร้าวไม่ขยายตัว ขนาดของรอยร้าวที่จะทำให้เกิดการขยายต่อได้ หรือขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น มีขนาด 7 มม. เมื่อพิจารณาความเค้นตกค้าง โดยมีขนาดใหญ่มากกว่า ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นเมื่อไม่พิจารณาความเค้นตกค้าง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานผลที่ได้สามารถนำมาออกแบบ ประเมิน และปรับปรุงการเชื่อมชนวบของรางรถไฟ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเอื้อเฟื้อสถานที่อุปกรณ์ และทุนจาก (1) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ (2) คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lewis, R. and U. Olofsson (2009). Wheel-Rail Interface Handbook, Woodhead Publishing, New Delhi.
- [2] Standard, B.-A. E. (2007). 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.
- [3] Cannon, D. F., et al. (2003). "Rail defects: an overview." Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 26: 865-886.
- [4] Ozakgul, K., et al. (2015). "An experimental investigation on flash butt welded rails." Engineering Failure Analysis 57: 2.
- [5] A. Ekberg, B. Paulsson, Concluding technical report, INNTRACK Project, International Union of Railways (UIC), Paris, 2010.
- [6] Skyttebol, A., et al. (2005). "Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses." Engineering Fracture Mechanics 72: 271-285.
- [7] Qiang, B., et al. (2018). "Through-thickness welding residual stress and its effect on stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks in a butt-welded steel plate " Engineering Fracture Mechanics 193: 17-31.
- [8] S. Suresh, Fatigue of materials, 2 ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [9] BS EN 13674-1: Railway applications - Track - Vignole railway rails 46 kg/m and above, British-Adopted European Standard, 2002.
- [10] 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, British-Adopted European Standard, 2007.
- [11] Maya-Johnson, S., et al. (2015). "Fatigue crack growth rate of two pearlitic rail steels." Engineering Fracture Mechanics 138: 63-72.
- [12] ABAQUS 6.13 Analysis User's Guide, Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [13] กชพร ภาตสูงเนิน และ ชีวิน บัวขาว (2561). การเปลี่ยนแปลงขนาดและการล้าของรางรถไฟที่เชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมชนวาบ. การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ, ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเพรส โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.
- [14] Dong, Y., et al. (2018). "Fatigue crack initiation assessment of welded joints accounting for residual stress." Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures: 1-15.
- [15] Zhu, X.-K. (2014). Numerical Calculation of Residual Stress Corrected J-Integral Using ABAQUS. ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, California, USA.