

การประเมินค่าความแข็งวิกฤต ณ บริเวณกระทบร้อนในการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Evaluation of Critical HAZ Hardness in Railway Steel During Repair Welding by Finite Element Method

เจษฎา แก้ววิชิต¹ สัญญา คำจริง^{2*} และ อมรศักดิ์ ไม้ใหญ่³

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)

³สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน

Jesada Kaewwichit¹ Sanya Kumjing^{2*} and Amornsak Mayai³

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Suphanburi),

²Department of Tool and Die Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Nonthaburi),

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan

*Corresponding author Email: sanya.k@rmutsb.ac.th

(Received: June 6, 2024 / Revised: June 21, 2024 / Accepted: June 22, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าความแข็งวิกฤต ณ บริเวณกระทบร้อนในการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟ เกรด R0900A ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยการดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ขั้นตอนแรกทำการเชื่อมบนเหล็กรางรถไฟด้วยกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) ใช้กระแสในการเชื่อม 180 แอมป์ แรงดัน 22-24 โวลต์ และความเร็ว 1.27 มม./วินาที ขณะเชื่อมทำการบันทึกอัตราการเย็นของแนวเชื่อม ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งได้นำไปทดสอบเทียบการวิเคราะห์ความร้อนในแบบจำลองการเชื่อมด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนที่สอง ในส่วนนี้เป็นการประเมินช่วงความกว้างของบริเวณกระทบร้อน และอัตราการเย็นตัว ($\Delta T_{8/5}$) ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความแข็งวิกฤตที่เกิดขึ้นโดยอ้างอิงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่า $\Delta T_{8/5}$ และค่าความแข็งจากการทดลอง การประเมินค่าความแข็งวิกฤตสำหรับงานเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟ ส่วนสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายค่าความแข็งวิกฤต ณ ตำแหน่งต่างๆ กับชิ้นงานจริง ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งที่ได้จากการทำนาย ณ บริเวณกระทบร้อน มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 494.6-513.1 HV และค่าความแข็งที่ได้จากชิ้นงานจริงภายหลังการเชื่อม มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 516.3-570.4 HV ซึ่งโดยรวมแล้วค่าความแข็งวิกฤตที่ได้จากการทำนายและทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าค่าความแข็งจากการทดลองจริงจะมีค่าสูงกว่าการทำนายประมาณ 60 HV โดยการแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้สามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบข้อปฏิบัติงานเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการแตกร้าวขณะเย็นตัว (Cold cracking) ต่อไป

คำสำคัญ: ทำนายค่าความแข็งวิกฤต ณ บริเวณกระทบร้อน, อัตราการเย็นตัว, การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research aims to evaluate the critical Hardness at the HAZ in the repair welding of R0900A grade railway steel by the finite element method (FEM). Works were divided into 3 parts; firstly, actual welding on a railway steel by Flux Cored Arc Welding process (FCAW). Welding conditions were set up of a welding current of 180 A, a voltage of 22-24 V, and a welding speed of 1.27 mm/sec. During welding, 3 points of cooling temperature were measured. The relationship between temperature and time is obtained. Such data were used to verify thermal distribution for FEM. Secondly, FEM was carried out in order to determine the width of HAZ, as well as, cooling rate ($\Delta T_{8/5}$). Such the $\Delta T_{8/5}$ was employed to estimate critical Hardness at the HAZ. As previous research experiment, mathematical model between hardness and $\Delta T_{8/5}$ was established for this work. Finally, comparison of critical HAZ hardness between FEM and experiments was performed. As the results, it revealed that the critical HAZ hardness of FEM model was 494.6-513.1 HV. Meanwhile, the experiments provided 516.3-570.4 HV. The FEM simulation was relatively agreed with the experiment. The maximum error value of prediction was approximately 60 HV. This FEM approach is able to apply in properly welding procedure in order to avoid cold cracking in the future.

Keyword: Predict the critical hardness at HAZ, Cooling rate, Finite Element Simulation (FEM)

1. บทนำ

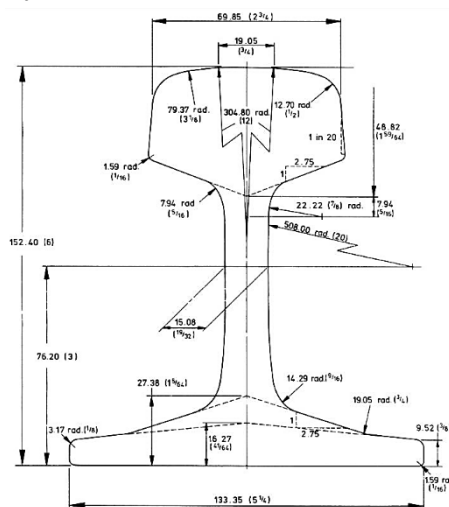
ในปัจจุบันการคมนาคมและการขนส่งในประเทศไทยมีความสำคัญอย่างมากโดยเฉพาะการคมนาคมและการขนส่งทางรางซึ่งได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีการขยายงานอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา กระทรวงคมนาคมมีแผนงานการปรับปรุงระบบและโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อพัฒนาระบบรถไฟรางคู่มาแทนระบบรางเดี่ยว ระบบโครงสร้างพื้นฐานอย่างหนึ่งคือการวางรางรถไฟ การวางรางรถไฟใหม่รวมถึงการบำรุงทางจะต้องมีการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้โดยเฉพาะการเชื่อมซ่อมบำรุง สำหรับเหล็กรางรถไฟประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ หัวราง (Head) เอรราง (Web) และฐานราง (Foot) สำหรับเหล็กรางรถไฟเมื่อผ่านการใช้งานก็จะเกิดการชำรุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการชำรุดที่บริเวณหัวราง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการสัมผัสกับล้อรถไฟ การเปลี่ยนรางรถไฟใหม่แทนที่รางรถไฟที่ชำรุดเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูงและมีความยุ่งยากเป็นอย่างมาก ดังนั้นการซ่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานจึงเป็นสิ่งจำเป็น [1] ซึ่งในกระบวนการเชื่อมซ่อมเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยการเชื่อมซ่อมบนหัวราง จะมีอยู่หลักๆ กระบวนการเชื่อม ได้แก่ กระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA) และกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คลอซ์ (FCAW) โดยกระบวนการเชื่อมทั้งสองแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน จากที่กล่าวมามีการเปรียบเทียบการเชื่อมพอกผิวบนหัวรางรถไฟระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA) และกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คลอซ์ (FCAW) โดย FCAW มีประสิทธิภาพมากกว่า MMA การประยุกต์ใช้ FCAW ใช้วัสดุน้อยกว่าโดยเฉลี่ย 2 เท่า อัตราการเติมเนื้อโลหะเร็วกว่า 3 เท่า และวัสดุที่ใช้โดยรวมถูกกว่า MMA 3 เท่า ซึ่งได้คุณภาพที่ดีของแนวเชื่อมระหว่างชิ้นแนวเชื่อมและชิ้นของโลหะพื้นฐานส่วนที่สึกหรอและเสียหาย [2] สิ่งสำคัญประการหนึ่งเกี่ยวกับคุณภาพของการเชื่อมต่อการเชื่อมคือการลดลงของความแข็งที่เรียกว่าโซนอ่อน (Soft zones) ซึ่งอยู่ที่ทั้งสองด้านของรอยเชื่อมที่ช่วงเปลี่ยนจาก HAZ เป็นโลหะพื้นฐาน (BM) ความแข็งที่ลดลงเหล่านี้อาจปรากฏแตกต่างกันเด่นชัดสำหรับเกรดเหล็กและกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกัน สาเหตุที่ความแข็งลดลงในบริเวณนี้คือการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากการเชื่อมวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการจัดการกับความท้าทายในการเชื่อมครั้งนี้ คือ การรักษาขนาดของ HAZ ให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยการลดความร้อนนำเข้าไป อย่างไรก็ตาม การเชื่อมด้วยความร้อนนำเข้าไป (Heat input) ที่ลดลงอาจทำให้เกิดข้อบกพร่องในรอยต่อเนื่องจากการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ด้านข้างแนวเชื่อม ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นการแตกร้า

ได้ภายใต้การรับโหลดแบบวัฏจักร (Cyclic load) และอาจแสดงให้เห็นลักษณะความรุนแรงมากขึ้นในราง นอกจากนี้ อัตราการเย็นตัวยังเพิ่มขึ้นอีกด้วยและนำไปสู่การก่อตัวของเฟสที่ไม่พึงประสงค์ เช่น Bainite และ Martensite ซึ่งเป็นสิ่งต้องห้ามตามมาตรฐานการเชื่อมทางรถไฟ [3-6] จึงมีความต้องการสำหรับขั้นตอนการเชื่อมราง ซึ่งวัตถุประสงค์ได้รับการปรับให้เหมาะสมอย่างแม่นยำเพียงพอที่ความน่าเชื่อถือเพียงพอและต้นทุนการลงทุนที่เหมาะสม สิ่งหนึ่งที่สำคัญมากงานที่จะเอาชนะความท้าทายที่อธิบายไว้ข้างต้นคือการปรับความร้อนนำเข้าให้เหมาะสมสำหรับแต่ละชั้นเช่นผิวชั้นที่เพียงพอคือรับประกันอย่างต่อเนื่องในด้านหนึ่งและทางกลคุณสมบัติใน HAZ เทียบกับที่ทำการเชื่อมวัสดุจะลดลงน้อยที่สุดในอีกด้านหนึ่งมีการเลือกใช้การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อสนับสนุนการพัฒนากระบวนการเป็นความพยายามในการทดลองเชื่อมสำหรับสิ่งเหล่านี้ ชิ้นส่วนหนักที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่จะสูงมาก โดยการจำลองเชิงตัวเลขถูกนำมาใช้ในสาขาต่างๆ มากมายในอุตสาหกรรมและการวิจัยเพื่อรองรับกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมงาน สามารถศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ เช่น พฤติกรรมของบ่อหลอมเชื่อม การบิดเบือนและความเค้นตึงตลอดจนการแปลงเฟสและการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องของโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติของรอยต่อ ชุดซอฟต์แวร์ต่างๆ ที่มีจำหน่ายทั่วไป เช่น SYSWELD, SimWeld, DynaWeld และ SimuFact ด้วยเป็นตำราการจำลองการเชื่อมทั่วไปจำนวนมาก เช่น เป็นข้อพิสูจน์ว่าการจำลองเชิงตัวเลขในการเชื่อมสามารถถือเป็นเครื่องมือที่ล้ำสมัยสำหรับการใช้งานที่หลากหลายทุกวันนี้การศึกษาเกี่ยวกับการทำนายการเสีรูปการจำลองการเชื่อมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองการเชื่อมผ่านการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์และปรับปรุงคุณภาพการเชื่อม การปรับปรุงแหล่งความร้อนในการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญ แบบจำลองแหล่งความร้อนแบบกระจายถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยทั่วไปแล้วแหล่งความร้อนแบบเกาส์เซียน มีข้อดีคือเหมาะสำหรับการจำลองโดยการเปลี่ยนแหล่งความร้อนที่ไม่มีที่สิ้นสุดให้อยู่ในรูปของแหล่งความร้อนที่จำกัดโดยการใช้แนวคิดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีประสิทธิภาพ ในบรรดาแบบจำลองแหล่งความร้อนแบบเกาส์เซียนประเภทต่างๆ โมเดลที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด คือ โมเดลแหล่งความร้อนของ Goldak [7]

ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความมุ่งหมายในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเชื่อมและการประเมินค่าความแข็งแรงวิกฤต ณ บริเวณกระแทกร้อนในการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟ เพื่อใช้เป็นแนวทางในกำหนดขั้นตอนปฏิบัติงานเชื่อมที่เหมาะสมในป้องกันการแตกร้าวขณะเย็นตัว (Cold cracking) ต่อไป

2. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

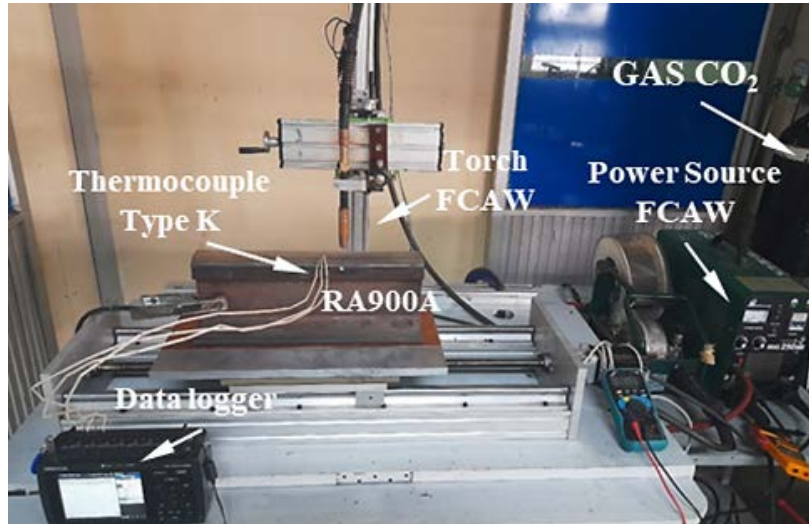
วัสดุที่ใช้สำหรับการทดลองผลิตจากเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ (Eutectoid Steel) เกรดเหล็กรางรถไฟ R0900A โดยมีผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Optical Emission Spectroscopy, OES) ดังตารางที่ 1 และขนาดของรางรถไฟที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 1 อ้างอิงตาม British standard; BS11-1985 BS100A R0900A



รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานทดลองเหล็กรางรถไฟเกรด R0900A [8]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี (โดยน้ำหนัก%)

Grade of Steel	Chemical composition, Elements in % of mass					
	C	Mn	Si	Cr	P	S
R0900A	0.7051	1.227	0.2078	0.0196	0.233	0.0037


รูปที่ 2 การติดตั้งการเชื่อมฟลักซ์คอร์ และติดตั้งอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ดำเนินการทดลองประกอบด้วยกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) ซึ่งทำการติดตั้งหัวเชื่อมให้อยู่กับที่ในตำแหน่งท่าราบ (Flat position) ขณะที่ชิ้นงานเหล็กทรงกลมไฟเกรด R0900A ถูกทำให้เคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนดด้วยรางเลื่อนอัตโนมัติ ค่าพารามิเตอร์การเชื่อมถูกกำหนดดังตารางที่ 2 นอกจากนี้ขณะเชื่อมได้ทำการตรวจวัดวัฏจักรอุณหภูมิ (Thermal cycle) บริเวณด้านข้างแนวเชื่อม จำนวน 3 จุด ด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม. ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดได้ 1200 °C และใช้เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ MIDI Logger รุ่น GL900 โดยได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาการเย็นตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ จากแนวเชื่อมเพื่อวิเคราะห์อัตราการเย็นตัวและเป็นข้อมูลทวนสอบการจำลองแบบการเชื่อมจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Welding simulation) ต่อไป

ตารางที่ 2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม FCAW

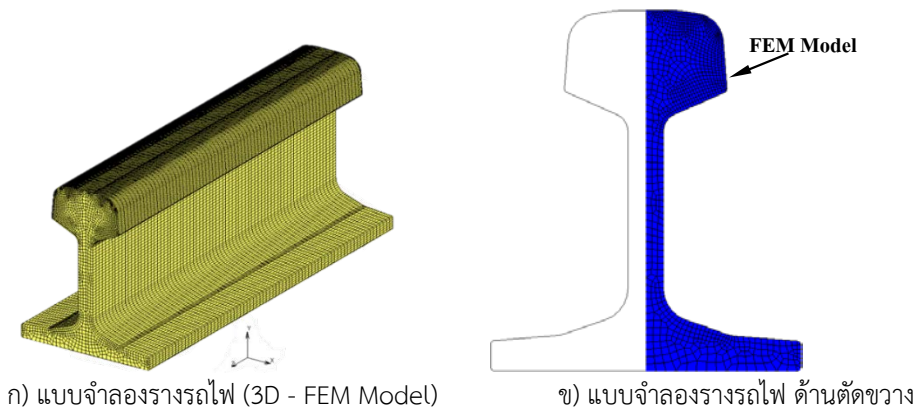
ตัวแปรงานเชื่อม	
กระแส (แอมป์)	180
แรงดัน (โวลต์)	22-24
ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	1.27
ระยะยื่นของลวดเชื่อม CTWD (มม.)	15
เกรดของลวดเชื่อม	E71T-11
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวดเชื่อม (มม.)	1.2

3. วิธีการดำเนินงาน

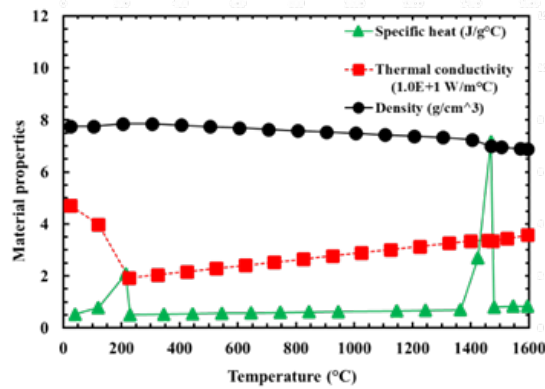
การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ขั้นตอนแรกทำการเชื่อมบนเหล็กรางรถไฟด้วยกระบวนการเชื่อมพลาสมา (FCAW) ขณะเชื่อมทำการบันทึกอัตราการเย็นของแนวเชื่อม ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งนำไปการสอบเทียบการวิเคราะห์ความร้อนในแบบจำลองการเชื่อมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป สำหรับขั้นตอนที่สองนี้เป็นการจำลองการเชื่อมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ลักษณะการวิเคราะห์แบบความร้อนที่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลา (Transient-thermal analysis) และแหล่งความร้อนแบบเคลื่อนที่ (Moving heat source) โดยใช้โปรแกรม MSC Marc ผลการคำนวณทางความร้อนได้นำมาประเมินช่วงความกว้างของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) และช่วงเวลาการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 800 °C จนถึง 500 °C เรียกว่า $\Delta T_{8/5}$ ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความแข็งวิกฤตที่เกิดขึ้น โดยอ้างอิงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่า $\Delta T_{8/5}$ และค่าความแข็งจากการทดลองของคณะผู้วิจัยก่อนหน้านี้ [9] ส่วนสุดท้ายเป็นการทวนสอบโดยการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายค่าความแข็งวิกฤต ณ ตำแหน่งต่างๆกับชิ้นงานเชื่อมจริง

3.1 การจำลองงานเชื่อมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการเชื่อมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของรางรถไฟดังแสดงในรูปที่ 3 การวิเคราะห์กำหนดเป็นลักษณะแบบความร้อนที่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลา (Transient-thermal analysis) และแหล่งความร้อนแบบเคลื่อนที่ (Moving heat source) ซึ่งคล้ายคลึงกับบ่อหลอมที่เคลื่อนที่ไปขณะเชื่อม นอกจากนี้กำหนดให้มีการจำลองแบบด้วยเทคนิค Birth and Death Element เสมือนการเติมเนื้อเชื่อมจากลวดเชื่อมนั่นเอง โดยการวิเคราะห์ประมวลผลด้วยโปรแกรม MSC Marc ผลการคำนวณทางความร้อนได้นำมาประเมินช่วงความกว้างของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) และช่วงเวลาการเย็นตัว $\Delta T_{8/5}$ ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความแข็งวิกฤต ขณะที่กำหนดค่าสมบัติทางความร้อนเหล็กรางรถไฟขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ได้แก่ ค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่นของวัสดุ แสดงดังแสดงในรูปที่ 4



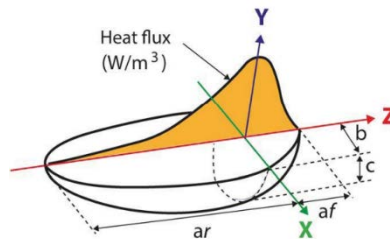
รูปที่ 3 แบบจำลอง 3 มิติของรางรถไฟสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4 สมบัติทางความร้อนสำหรับแบบจำลองการเชื่อมอาร์คไฟฟ้า [6]

3.2 การกำหนดค่าแหล่งความร้อนของการอาร์ค (Moving Heat Source)

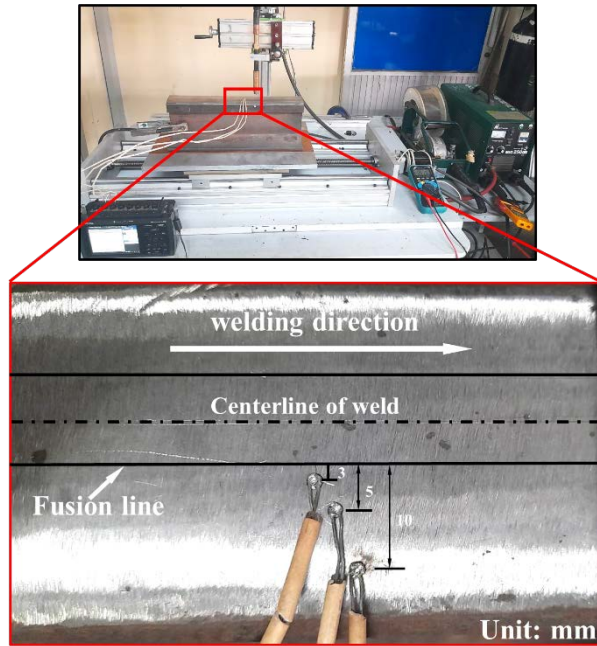
ในการจำลองการเชื่อมนี้แหล่งความร้อนแบบเคลื่อนที่ (Moving heat source) ซึ่งคล้ายคลึงกับบ่อหลอมที่เคลื่อนที่ไปขณะเชื่อม ได้กำหนดค่าคงที่ของพารามิเตอร์รูปร่างแหล่งความร้อนของการอาร์ค เช่น af , ar , b และ c ดังแสดงในรูปที่ 5 ถูกกำหนดไว้ที่ 3, 5, 8 และ 3 มม. ตามลำดับ ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างการเชื่อม ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อมในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดค่าเท่ากับ 0.75 ซึ่งใกล้เคียงกับกระบวนการเชื่อม FCAW และการสอบเทียบผลการตรวจวัดอุณหภูมิขณะเชื่อมดังได้กล่าวมาข้างแล้ว



รูปที่ 5 ลักษณะแหล่งความร้อนรูปร่างรีคู้ของ Goldak สำหรับการจำลองการเชื่อม [10]

3.4 การทวนสอบวัฏจักรทางความร้อนระหว่างแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองเชื่อมจริง

ในการทวนสอบอัตราการเย็นตัวหรือช่วงเวลาการเย็นตัว $\Delta T_{8/5}$ ระหว่างแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองเชื่อมจริง ได้ดำเนินการโดยการเปรียบเทียบแนวโน้มของเส้นวัฏจักรทางความร้อนระหว่างการเชื่อมจำนวน 3 จุดด้านข้างแนวเชื่อม โดยทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด Type K เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิการเย็นตัวระหว่างการเชื่อม ระยะห่างในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ได้แก่ 3, 5 และ 10 มม. ตามลำดับ จากบริเวณขอบแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 6 จากนั้นนำผลบันทึกเส้นวัฏจักรทางความร้อนระหว่างการเชื่อมที่ได้ไปเปรียบเทียบแนวโน้มความความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองด้วยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

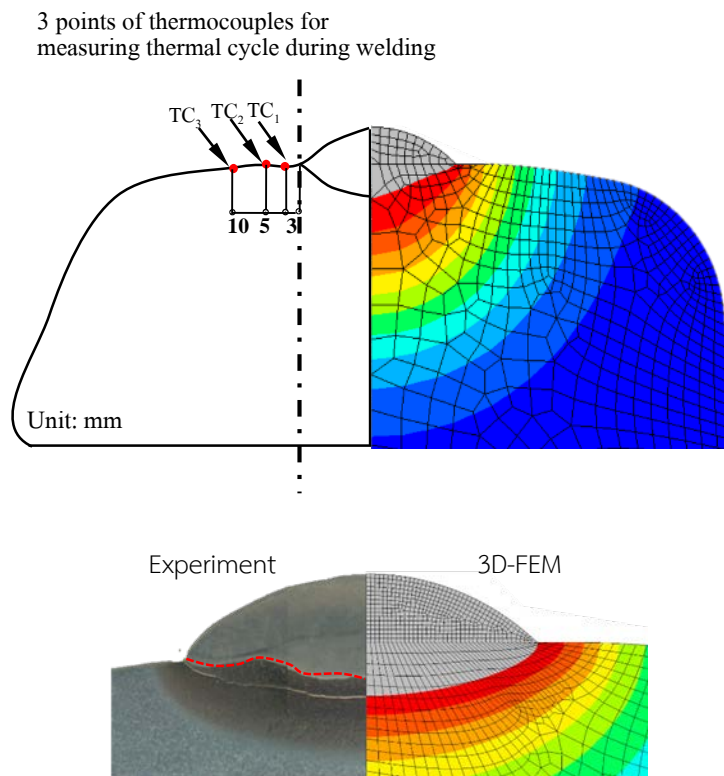


รูปที่ 6 ระยะการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล Type K

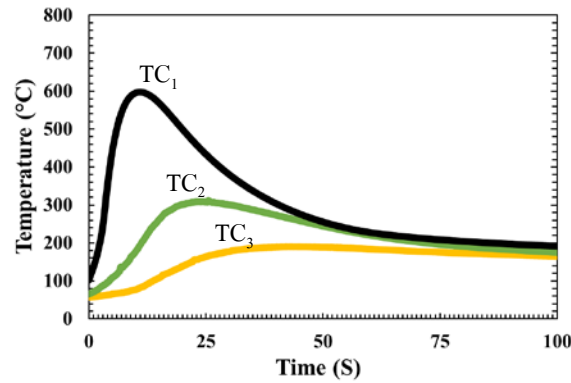
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทวนสอบวัฏจักรทางความร้อนระหว่างแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองเชื่อมจริง

จากรูปที่ 7 แสดงลักษณะภาพตัดขวางของการเปรียบเทียบความกว้างและความลึกแนวเชื่อมระหว่างผลการจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองเชื่อมจริง โดยด้านซ้ายมือแสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง

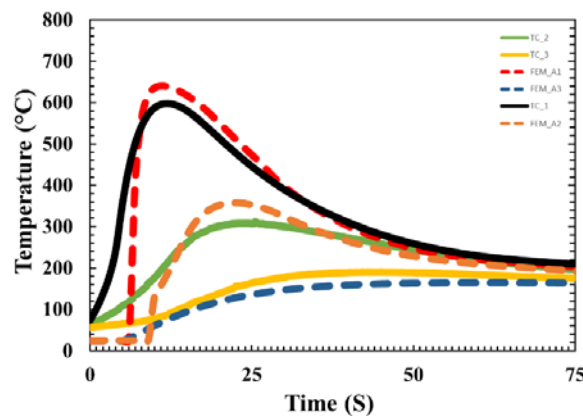


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบขนาดรอยเชื่อมระหว่างผลการจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองเชื่อมจริง



รูปที่ 8 เส้นโค้งวัฏจักรทางความร้อนขณะเชื่อมจากเทอร์โมคัปเปิล

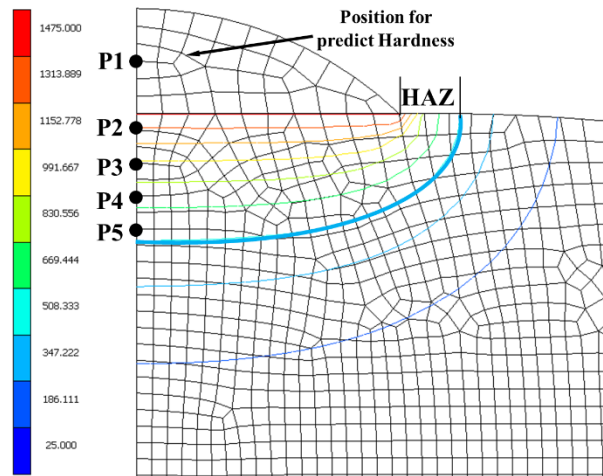
รูปที่ 8 แสดงเส้นโค้งอุณหภูมิการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมจากการวัดอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล พบว่าอัตราการเย็นของตำแหน่ง TC₁ มีค่าเท่ากับ 10.8 °C/s ตำแหน่ง TC₂ มีอัตราการเย็นตัว เท่ากับ 3.07 °C/s



รูปที่ 9 เปรียบเทียบภาพตัดขวางและเส้นโค้งอุณหภูมิการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมจากเทอร์โมคัปเปิลและการจำลอง FEM

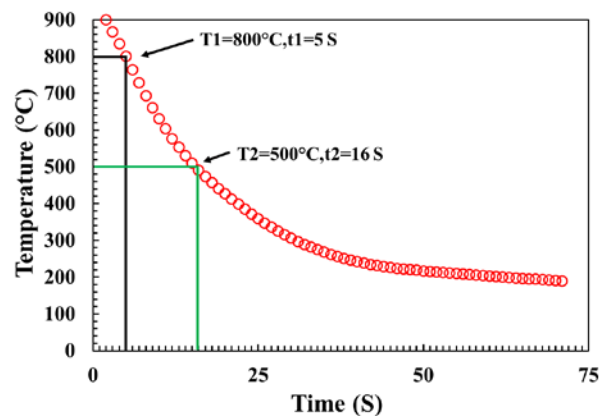
จากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบภาพตัดขวางระหว่างการทดลองและการจำลอง FEM พบว่ารูปร่างของบ่อหลอมถูกปรับขนาดของแหล่งความร้อนในการอาร์คจนเป็นที่น่าพอใจและตรงกับขนาดของบ่อหลอมในการทดลอง ซึ่งจากที่กล่าวมาพบว่าอุณหภูมิเส้นโค้งการเย็นตัวที่ตำแหน่งเดียวกันกับการติดเทอร์โมคัปเปิล จะเห็นได้ว่ามีเส้นโค้งอุณหภูมิการเย็นตัวใกล้เคียงกัน โดยคณะผู้วิจัยสนใจช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 800 °C ลดลงถึง 500 °C ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมโดยมีโอกาสในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสูงและค่าความแข็งมีโอกาสเปลี่ยนเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงนำการจำลอง FEM ไปทำนายค่าความแข็งที่อยู่ตำแหน่งระหว่างบริเวณกระทันร้อน แสดงดังรูปที่ 10

4.2 การประมาณความกว้างของบริเวณกระทบร้อน (HAZ)



รูปที่ 10 ช่วงความกว้างของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) และตำแหน่งการประเมินค่าความแข็งวิกฤตบริเวณกระทบร้อน

จากรูปที่ 10 เป็นการประมาณค่าความกว้างของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) และแสดงถึงตำแหน่งที่ทำการทำนายความแข็ง ซึ่งจากอยู่ในบริเวณกระทบร้อน จะเห็นได้ว่าความกว้างของ HAZ ดูจากบริเวณด้านบนความกว้างมีค่าประมาณ 2 มม. และดูจากระดับผิวของรางรถไฟลงไปความกว้างของ HAZ มีค่าความกว้างประมาณ 5 มม.



รูปที่ 11 ตำแหน่งการคำนวณอุณหภูมิการเย็นตัว $\Delta T_{8/5}$

จากรูปที่ 11 แสดงตำแหน่งการคำนวณอุณหภูมิการเย็นตัว $\Delta T_{8/5}$ โดยคำนวณจากอุณหภูมิการเย็นที่อยู่ในช่วง 800 °C ถึง 500 °C ที่ตำแหน่ง P1 มีค่า $\Delta T_{8/5}$ เท่ากับ 8 วินาที, ตำแหน่ง P2 มีค่า $\Delta T_{8/5}$ เท่ากับ 8.25 วินาที, ตำแหน่ง P3 มีค่า $\Delta T_{8/5}$ เท่ากับ 8.5 วินาที, ตำแหน่ง P4 มีค่า $\Delta T_{8/5}$ เท่ากับ 9 วินาที และ ตำแหน่ง P5 มีค่า $\Delta T_{8/5}$ เท่ากับ 9.5 วินาที

4.3 การประเมินค่าความแข็งวิกฤตบริเวณกระทบร้อน

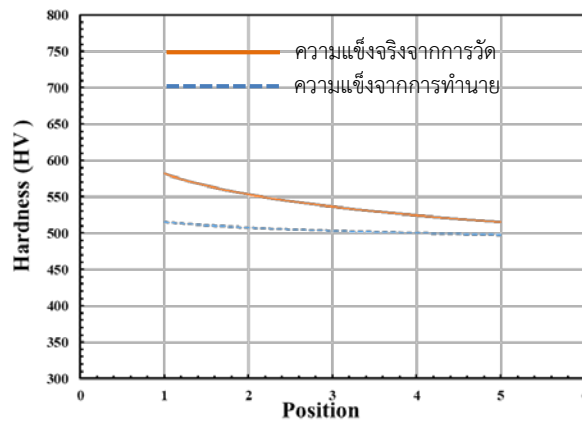
ภายหลังจากได้ค่าของ $\Delta T_{8/5}$ จากตำแหน่งอุณหภูมิการเย็นตัวที่กำหนดในไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงนำมาทำนายค่าความแข็งสูงสุดสำหรับเหล็กกล้ารางรถไฟเกรด R0900A หรือ เหล็กกล้ายูเทคตอยด์ (Eutectoid Steel) ซึ่งในการทำนายค่าความแข็งวิกฤตบริเวณกระทบร้อน อ้างอิงจากการทดลองของคณะผู้วิจัยก่อนหน้านี้ [9] โดยได้ทำนายค่าความแข็งจากสมการที่ 1

$$\text{Predicted Hardness} = 798.87(\Delta T_{8/5})^{-0.213} \quad (1)$$

ภายหลังจากการแทนค่าในสมการที่ 1 ได้ผลการเย็นตัวที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 800°C ถึง 500°C ซึ่งทราบช่วงเวลาในการของแต่ละตำแหน่งค่าความแข็งจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายค่าความแข็งและจากการวัดค่าความแข็งจริง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระหว่างการทำนายค่าความแข็งและจากการวัดค่าความแข็งจริง

ตำแหน่ง	$\Delta T_{8/5}$ (s)	ทำนายค่าความแข็ง บริเวณกระทบบร้อน (HV)	ค่าความแข็งที่ได้จาก การวัด (HV)
P1	8	513.1	570.4
P2	8.25	509.6	551.5
P3	8.5	506.4	516.3
P4	9	500.3	522.4
P5	9.5	494.6	532.7



รูปที่ 12 เปรียบเทียบระหว่างความแข็งที่วัดจริงและความแข็งจากการทำนาย

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งที่วัดจริงและความแข็งจากการทำนาย ค่าความแข็งที่ได้จากการวัดจริงมีความแข็งอยู่ระหว่าง 516.3-570.4 HV และความแข็งที่ได้จากการจำลอง FEM มีค่าอยู่ระหว่าง 494.6-513.1 HV จากการเปรียบเทียบผลบ่งชี้ว่าค่าความแข็งวิกฤตจากการจำลองและจากการวัดจริงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการประเมินความแข็งวิกฤตสำหรับงานเชื่อมเชื่อมเหล็กแรงรถไฟ ๓ บริเวณกระทบบร้อนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัว และเคลต้า $T_{8/5}$ [9] ดังนั้นจึงสามารถใช้ผลที่ได้จากการจำลองไปทำนายความแข็งวิกฤตก่อนการเชื่อมในครั้งถัดไปได้

5. สรุป

จากการประเมินค่าความแข็งวิกฤต ณ บริเวณกระทบบร้อนในการเชื่อมเชื่อมเหล็กแรงรถไฟด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

ผลการทดลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความแข็งและจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิงานเชื่อมด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ผลเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงมีผลค่าความแข็งที่สอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งจากการทดลองจริงมีค่ามากกว่าการทำนายอยู่ในช่วงบวกสูงสุดที่ 60 HV หรืออาจเป็นลบ และข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบข้อปฏิบัติงานเชื่อมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพสำหรับการทดลองครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tipsunave, C., Thawornsupacharoen, P., Hommuang, S., Simlee, K., & Paitoonphon, S. (2019). Office of the Permanent Secretary. Ministry of Transport. Retrieved February 1, 2020.
- [2] Dijis Sergejevs, Andris Tipainis, Pavels Gavrilovs, Restoration of Railway Turnout Elements with Manual Metal Arc Welding and Flux-Cored Arc Welding, Procedia Engineering 134 (2016) 353 -358.
- [3] Micenko P, Li H (2013) Double dip hardness profiles in rail weld heat-affected zone-literature and research review report.Brisbane, Australia.
- [4] Maalekian M (2007) Friction welding of rails, Dissertation Graz niversity of Technology 8. Mutton P, Cookson J, Qiu C, Welsby D (2016) Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds. Wear:1–10.
- [5] Fletcher GVDI, Franklin FJ, Garnham JE, Muyupa E, Papaalias M, Davis CL, Kapoor A, Widiyarta M (2008) Three-dimensional microstructural modelling of wear, crack initiation and growth in rail steel. Int J Railw 1:106–112.
- [6] “Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant.” Austrian/European Standard OENORMEN 14587–1, 2008.
- [7] Pyo, C.; Jeong, S.-M.; Kim, J.; Park, M.; Shin, J.; Kim, Y.; Son, J.; Kim, J.-H.; Kim, M.-H. A Study on the Enhanced Process of Elaborate Heat Source Model Parameters for Flux Core Arc Welding of 9% Nickel Steel for Cryogenic Storage Tank. J.Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 1810.
- [8] British standard BS11-1985, BS100A, R0900A, <https://www.railwayrail.com/products/bs-100a-steel-rail/>.
- [9] R. Phaoniam, S. Wonthaisong, N. Intawong, J. Chara and K.Nurinram, “Evaluation of HAZ hardness critical during railtraeie-welding repair using the barrister between cooling rate and $\Delta T_{8/5}$ ” RMTC2023 (2023).
- [10] J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby; “A New Finite Element Model for Welding Heat Sources”, J. Metallurgical Transactions B, Vol. 15B, (1984), p.299-305.