

Research Article

การวิเคราะห์ขีดความสามารถเชิงความร้อนและกลศาสตร์
ของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่งได้

Thermo-Mechanical Capability Analysis of an Adjustable Positioning
Clamping Arm for Welding Workpieces

ศุภวิชญ์ พิชัย¹ และ กิตติพล ขาวงาม^{1*}

Supawit Pichai¹ and Kittipon Khaongam^{1*}

¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมการเชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹Department of Welding Technical Education, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Isan, Khon kaen Campus

*Corresponding author E-mail; kittipon.khaongam@hotmail.com

Received: June 09, 2026

Revised: July 17, 2026

Accepted: August 18, 2026

Available online: August 25, 2026

APA Citation:

Pichai, S., & Khaongam, K. (2026). Thermo-Mechanical Capability Analysis of an Adjustable Positioning Clamping Arm for Welding Workpieces. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(2), 69–88. <https://doi.org/10.14456/brujit.2026.5>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ขีดความสามารถเชิงโครงสร้างของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่งได้ภายใต้ภาระทางกล และความร้อนร่วมกันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพหิกลศาสตร์ร่วม (Coupled-field Finite Element Analysis) ด้วยโปรแกรม ANSYS ในการจำลองพฤติกรรมรับแรง และการถ่ายเทความร้อนของโครงสร้างเหล็กกล้า S275 ภายใต้แรงกดแบบเยื้องศูนย์กลางขนาด 11.57 N และช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 450 °C พร้อมทวนสอบความแม่นยำด้วยการคำนวณเชิงทฤษฎีทางกลศาสตร์วิศวกรรมผลการวิเคราะห์พบว่าภายใต้ภาระทางกลเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิห้องโครงสร้างมีความแข็งแรงสูงด้วยความเค้นเทียบเท่าอนมิเซสสูงสุด 4.76 MPa และค่าความปลอดภัย 49.8 สำหรับการวิเคราะห์แบบพหิกลศาสตร์ร่วมพบว่าความเค้นสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 43.38 MPa ที่ 25 °C เป็น 364.45 MPa ที่ 450 °C ส่งผลให้ค่าความปลอดภัยลดลงจาก 6.34 ที่อุณหภูมิห้องเหลือ 1.63 ที่ 200 °C และลดลงต่ำกว่า 1.00 เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าประมาณ 255 °C ที่อุณหภูมิ 300 °C โครงสร้างมีค่าความปลอดภัยเพียง 0.71 ซึ่งบ่งชี้ว่าเกิดการเสียรูปถาวรก่อนถึง 300 °C ผลการวิจัยยืนยันว่าภาระทางความร้อนเป็นปัจจัยกำหนดกลไกการวิบัติของอุปกรณ์จับยึดมากกว่าภาระทางกลการศึกษาจึงกำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเชิงปฏิบัติการไม่เกิน 250 °C เพื่อความปลอดภัย

ในการใช้งานพร้อมทั้งเสนอกรอบการวิเคราะห์ที่ผ่านการทวนสอบซึ่งสามารถลดความจำเป็นในการสร้างชิ้นงานต้นแบบทางกายภาพได้

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเค้นทางความร้อน พฤติกรรมทางกลศาสตร์ การถ่ายเทความร้อน แขนจับยึดชิ้นงานเชื่อม

Abstract

The purpose of the current research is to examine the structural capacity of a clamping arm that helps position a workpiece in the welding operation when subjected to mechanical and thermal loads, which can be adjusted. The coupled field finite element simulation was carried out on S275 structural steel using ANSYS software by subjecting the material to an eccentric compression force of 11.57 N while varying the temperature within the range of 25-450 °C. The accuracy of the proposed model was confirmed using theoretical predictions based on engineering mechanics. It has been observed that in the presence of mechanical load, it exhibits extremely high capacity with maximum Von Mises equivalent stress of 4.76 MPa and factor of safety (F.S.) of 49.8 at room temperature. According to the coupled-field analysis, it can be stated that the stress level rises from 43.38 MPa at 25 °C to 364.45 MPa at 450 °C, leading to a decrease in factor of safety from 6.34 at room temperature to 1.63 at 200 °C and becomes less than 1.00 if the temperature is above around 255 °C. At 300 °C, the F.S. becomes 0.71, hence plastic collapse takes place even before reaching 300 °C. It has been observed that the failure of the device is caused mainly by thermal loading and not mechanical loading. It thus provides the upper limit of operating temperature as 250 °C and safety definitions for industrial purposes, and the analytical framework too, which are validated and minimize the need for fabricating prototype specimens.

Keywords: Finite Element Analysis, Thermal Stress, Mechanical Behavior, Heat Transfer, Welding Workpiece Clamping Arm

1. บทนำ

งานเชื่อมเป็นกระบวนการผลิตพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เช่น การผลิตยานยนต์ การต่อเรือ การผลิตเครื่องจักรกลหนักและการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กคุณภาพ [1] และความน่าเชื่อถือของรอยเชื่อมส่งผลต่อความปลอดภัยความทนทานและสมรรถนะการใช้งานระยะยาวของโครงสร้างทางวิศวกรรมเมื่อโครงสร้างอุตสาหกรรมมีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้นการรักษาคุณภาพงานเชื่อมควบคู่ไปกับการเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน [2] ประสิทธิภาพการผลิตจึงกลายเป็นความท้าทายสำคัญทางวิศวกรรมในการปฏิบัติงานจริงช่วงเชื่อมมักต้องทำงานในพื้นที่จำกัด [3] และอยู่ในท่าทางที่ไม่เหมาะสมตามหลักการยศาสตร์ เช่น การยกแขนเหนือศีรษะ การก้มคอ หรือการนั่งยอง เพื่อเข้าถึงตำแหน่งเชื่อมที่ยากต่อการเข้าถึงการทำงานในลักษณะดังกล่าวเป็นเวลานานสัมพันธ์กับความล้าของกล้ามเนื้อโรกระบบกล้ามเนื้อและกระดูก ประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลงและคุณภาพรอยเชื่อมที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นอุปกรณ์จัดตำแหน่งชิ้นงานเชื่อมและระบบแขนจับยึดแบบปรับตำแหน่งได้จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย [4] ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อช่วยปรับตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่ในแนวเชื่อมที่เหมาะสมเฉพาะท่าราบซึ่งช่วยให้บ่อหลอมมีเสถียรภาพและลดการเกิดข้อบกพร่องของรอยเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้อุปกรณ์จัดตำแหน่งชิ้นงานเชื่อมจะมีข้อดีในด้านการปฏิบัติงานแต่ระบบดังกล่าวต้องเผชิญกับสภาวะการรับภาระแบบเทอร์โมกลศาสตร์ที่มีความซับซ้อนในระหว่างกระบวนการเชื่อมอาร์กอุณหภูมิบริเวณบ่อหลอมสามารถสูงเกินกว่า 1,500-6,000 °C [5] ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานเข้าสู่โครงสร้างรองรับหน้าแปลนจับยึดข้อต่อหมุนและแขนจับยึดความร้อนดังกล่าวก่อให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอและทำให้เกิดความเค้นทางความร้อนสะสมภายในโครงสร้างในขณะเดียวกันโครงสร้างยังต้องรองรับภาระทางกลจากน้ำหนักชิ้นงาน การรับแรงแบบเอียงศูนย์ และน้ำหนักตัวเองของระบบ นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้สมบัติทางกลของเหล็กโครงสร้าง เช่น ความเค้นครากความแข็งแรงและมอดูลัสยืดหยุ่นลดลง [6] ดังที่ Khaongam และ Srihajong [7] เคยชี้ให้เห็นแล้วว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและเสถียรภาพของระบบ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุและโครงสร้างทางวิศวกรรมความก้าวหน้าของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) ได้ช่วยเพิ่มศักยภาพในการศึกษาพฤติกรรมเชิงเทอร์โมกลศาสตร์ของโครงสร้างงานเชื่อมอย่างมาก Muránsky และคณะ [8] แสดงให้เห็นว่าการขยายตัวทางความร้อนและการอ่อนตัวของวัสดุที่อุณหภูมิสูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการจำลองการเกิดความเค้นตกค้างภายหลังการเชื่อมต่อมา Nie et al. [9] ได้พัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์เทอร์โมและกลศาสตร์แบบควบคู่ (coupled thermomechanical analysis) ซึ่งสามารถทำนายประวัติอุณหภูมิและการกระจายความเค้นตกค้างในกระบวนการเชื่อมได้อย่างแม่นยำ โดยผลการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองและมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำนอกจากนี้ Sun et al. [10] ยังแสดงให้เห็นว่าสภาวะการยึดจับและข้อจำกัดเชิงกลของชิ้นงานมีอิทธิพลอย่างมากต่อการกระจายความเค้นตกค้างและการเสียรูปที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเนื่องจากข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลต่อการขยายตัวและหดตัวทางความร้อนของวัสดุเฉพาะในบริเวณที่มีการสะสมความร้อนสูงในขณะที่ย Bercelli et al. [11] พบว่าความเค้นตกค้าง

จากกระบวนการเชื่อมมีผลต่อการลุกลามของรอยร้าวและความทนทานของโครงสร้างเชื่อมอีกทั้ง Venkatachari และ Kodur [12] ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับประเมินโครงสร้างเหล็กภายใต้ อุณหภูมิสูง โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตรวจสอบความถูกต้องแล้วผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิที่ เพิ่มขึ้นจากการเกิดเพลิงไหม้ที่รุนแรงส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างลดลง เนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุนอกจากนี้งานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์จับยึดงานเชื่อมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น Anual et al. [13] นำเสนอการออกแบบอุปกรณ์จับยึดโดยอาศัยการวิเคราะห์ทางความร้อนแบบชั่วขณะซึ่งแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานส่งผลกระทบอย่างมากต่อความสมบูรณ์ของอุปกรณ์จับยึด Liu และ Zhang [14] พัฒนาแบบจำลองความร้อนพลาสติกแบบยืดหยุ่นสามมิติที่รวมอุปกรณ์จับยึดและโต๊ะทำงานแสดงให้เห็นว่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าของแรงทางกลก่อนการเชื่อมส่วนการศึกษาของ Gong et al. [15] ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ซิกเคอดาวน์เชิงโครงสร้างโดยพิจารณาความเค้นครากที่ ขึ้นกับอุณหภูมิและภาระเทอร์โมกลศาสตร์ที่แปรผันซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อขีดความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของโครงสร้างทางด้าน Khaongam และ Khampong [16] ได้ ศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะภายใต้มุมเอียงและอัตราการเติม สารทำงานที่แตกต่างกันพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความหนืดและแรงตึงผิวของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นกลไกที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการทำความเข้าใจการสะสมความร้อนในโครงสร้างโลหะการศึกษาเหล่านี้ ร่วมกันเน้นย้ำถึงความจำเป็นอย่างยิ่งของการเชื่อมโยงทางความร้อนกลศาสตร์ในการออกแบบอุปกรณ์จับยึด ในส่วนของพฤติกรรมของเหล็กโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงงานวิจัยเกี่ยวกับเหล็ก S275 ซึ่งเป็นเกรดโครงสร้างที่ใช้ กันอย่างแพร่หลายเผยให้เห็นว่าวัสดุนี้คงความแข็งแรงไว้ประมาณ 50% จนถึงอุณหภูมิ 550 °C [17] Outinen และ Mäkeläinen [18] ศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงและหลังการเย็นตัวอย่างเป็น ระบบนอกจากนี้การศึกษาสมบัติคงค้างภายหลังเพลิงไหม้ [19] ยังแสดงให้เห็นว่าระดับน้ำหนักบรรทุกเริ่มต้น ระหว่างการสัมผัสไฟส่งผลกระทบอย่างสำคัญต่อความแข็งแรงคงค้าง Eurocode 3 [20] ให้ปัจจัยลดทอนที่ ขึ้นกับอุณหภูมิสำหรับความเค้นครากและมอดูลัสยืดหยุ่นแม้กระนั้นงานวิจัยล่าสุดได้ระบุข้อจำกัดของ แบบจำลองดังกล่าวสำหรับอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 10 °C/min [21] ในส่วนของงานวิจัยในประเทศ Thanoi et al. [22] ได้พัฒนาเครื่องตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกและให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติ เชิงกลของเหล็กโครงสร้างภายใต้ภาระทางกลผ่านการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการโดยใช้ดัชนี C_p และ C_{pk} ผลการศึกษาพบว่าเหล็ก S275 แสดงพฤติกรรมเชิงกลที่สม่ำเสมอภายใต้สภาวะการรับภาระที่ ควบคุมได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวไม่ได้พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิสูงที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุแม้ว่างานวิจัยข้างต้นจะช่วยยกระดับความเข้าใจเกี่ยวกับความเค้นทางความร้อนและการเสียรูปของโครงสร้างเชื่อมแต่การศึกษาส่วนใหญ่ ยังคงให้ความสำคัญกับรอยเชื่อมแผ่นโลหะหรือระบบจับยึดแบบเรียบง่ายโดยมีงานวิจัยจำนวนจำกัดที่ศึกษา ระบบแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่ง [15] ซึ่งมีกลไกการหมุนและลักษณะการรับแรงแบบเอียงศูนย์ นอกจากนี้หลายงานวิจัยยังคงวิเคราะห์ภาระทางความร้อนและภาระทางกลแยกออกจากกันการวิเคราะห์

โครงสร้างมักสมมติสภาวะอุณหภูมิห้องขณะที่การวิเคราะห์ทางความร้อนมักจะเลยผลกระทบร่วมของแรงทางกลและแรงโน้มถ่วงส่งผลให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวทางความร้อนการรับแรงแบบเยื้องศูนย์และการเสื่อมสภาพของวัสดุตามอุณหภูมิในระบบแขนจับยึดงานเชื่อมยังไม่ได้รับการทำความเข้าใจอย่างเพียงพอจากข้อจำกัดดังกล่าวยังคงมีช่องว่างทางการวิจัยที่สำคัญหลายประการประการแรกงานวิจัยที่วิเคราะห์พฤติกรรมเทอร์โมกลศาสตร์ของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่งภายใต้ภาระความร้อนและแรงทางกลพร้อมกันยังมีอยู่อย่างจำกัดประการที่สองอิทธิพลของอุณหภูมิสูงต่อเสถียรภาพของโครงสร้างภายใต้ภาระทางกลแบบเยื้องศูนย์ยังไม่ได้รับการวิเคราะห์อย่างครอบคลุมประการที่สามเกณฑ์อุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนผ่านจากสภาวะปลอดภัยไปสู่สภาวะเริ่มต้นการวิบัติยังไม่ชัดเจนสำหรับระบบจัดตำแหน่งชิ้นงานเชื่อมที่ผลิตจากเหล็กโครงสร้างเนื่องอิทธิพลของรูปทรงหน้าตัดและการออกแบบแขนหมุนต่อการสะสมความเค้นแบบเทอร์โมกลศาสตร์ยังไม่ได้รับการประเมินอย่างเป็นระบบ เพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงนำเสนอจุดเด่นที่แตกต่างจากงานวิจัยเดิมอย่างชัดเจน 3 ประการ ได้แก่ (1) การพัฒนารอบการวิเคราะห์แบบเทอร์โมกลศาสตร์ร่วม (Coupled thermomechanical analysis) ที่พิจารณาทั้งภาระทางกลแบบเยื้องศูนย์น้ำหนักตัวเองของโครงสร้างการนำความร้อนแบบคงตัวและการเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลตามอุณหภูมิภายใต้สภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูงพร้อมกันซึ่งต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีวิเคราะห์แยกส่วน (2) การประยุกต์ใช้กับระบบแขนจับยึดแบบปรับตำแหน่งซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตและกลไกการรับแรงที่ซับซ้อนครอบคลุมทั้งหน้าแปลนจับยึดข้อต่อหมุนและแขนหมุนซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษาอย่างเป็นระบบมาก่อน และ (3) การกำหนดเกณฑ์อุณหภูมิวิกฤตสำหรับเหล็กโครงสร้างเกรด S275 ที่โครงสร้างเปลี่ยนผ่านจากสภาวะปลอดภัยไปสู่สภาวะเริ่มต้นการวิบัติซึ่งจะเป็นแนวทางสำคัญสำหรับผู้ออกแบบในการประเมินความปลอดภัย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงเทอร์โมกลศาสตร์ของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่งที่ผลิตจากเหล็กโครงสร้างเกรด S275 ภายใต้ภาระความร้อนและภาระทางกลพร้อมกันโดยแบบจำลองเชิงตัวเลขได้รับการทวนสอบด้วยการคำนวณเชิงกลศาสตร์ทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ผลการศึกษานี้คาดว่าจะเป็แนวทางสำคัญในการออกแบบและประเมินความปลอดภัยของระบบรองรับงานเชื่อมสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมสมัยใหม่

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อวิเคราะห์และประเมินค่าความเค้นสูงสุดและค่าความปลอดภัยของแบบจำลองแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมภายใต้ภาระทางกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2 เพื่อวิเคราะห์การแผ่กระจายอุณหภูมิและประเมินผลกระทบของความเค้นทางความร้อนที่มีต่อความสามารถในการรับแรง

2.3 เพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ ความเค้น และค่าความปลอดภัย สำหรับประเมินขีดจำกัดความสามารถสูงสุดในการปฏิบัติงาน

3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 ศึกษาพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์และกลศาสตร์ของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมที่ทำจากเหล็กกล้า โครงสร้างเกรด S275 เน้นการวิเคราะห์ความเค้นวอนมิเชส Von Mises Stress และการเสียรูปภายใต้ความร้อนสะสม

3.2 ใช้โปรแกรม Shapr3D สร้างแบบจำลอง 3 มิติ และใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ FEA ผ่านโมดูล Static Structural และ Steady-State Thermal

3.3 กำหนดภาระแรงกดแบบเยื้องศูนย์กลางขนาด 11.57 N ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักของชิ้นงานเหล็กต้นแบบที่มีมวล 1.18kg และจำลองอุณหภูมิแปรผัน (Temperature Sweep) ตั้งแต่ 25 ถึง 450°C โดยเลือก 25°C เป็นอุณหภูมิห้องอ้างอิง และ 450°C เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่หน้าแปลนจับยึดอาจสัมผัสในกระบวนการเชื่อมอาร์ก เนื่องจากที่อุณหภูมินี้เหล็ก S275 มีปัจจัยลดความเค้นครากและมอดูลัสยืดหยุ่นตามมาตรฐาน EN1993-1-2 อย่างมีนัยสำคัญ (f_y ลดลงเหลือประมาณ 30%, E เหลือ 65% ของค่าที่อุณหภูมิห้อง) ซึ่งครอบคลุมขีดจำกัดการใช้งานของโครงสร้าง

3.4 งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมบนซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ไม่มีการสร้างชิ้นงานต้นแบบจริง

4. ทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย

4.1 กรอบทฤษฎีพื้นฐาน

การประเมินความสามารถเชิงโครงสร้างของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมอาศัยหลักการสมดุลสถิตสำหรับวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ภายใต้การรับแรงเยื้องศูนย์กลางซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดที่จุดรองรับ [23] สมการที่ (1)-(3)

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y = F \quad (2)$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow M_A = F \times d \quad (3)$$

เมื่อ F คือ แรงในแนวตั้งจากน้ำหนักชิ้นงาน (N), d คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางจากแนวแรงถึงจุดหมุน (m), และ M_A คือ โมเมนต์ดัดสูงสุดที่จุดรองรับ (N·m)

ความเค้นดัดสูงสุดที่หน้าตัดเพลาทรงกลมต้นคำนวณได้จาก สมการที่ (4) สัมพันธ์กับโมเมนต์ความเฉื่อยพื้นที่หน้าตัดตาม [24] สมการที่ (5)

$$\sigma_{\max} = \frac{M \times c}{I} \quad (4)$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (5)$$

เมื่อ $\sigma_{\max}$ คือ ความเค้นดัดสูงสุด (Pa), M คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด (N·m) c คือ ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวหน้าตัดด้านนอกสุด (m), I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (m⁴) และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา (m) ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) กำหนดตาม [25] สมการที่ (6)

$$F.S. = \frac{\sigma_{\text{yield, design}}}{\sigma_{v, \max}} \quad (6)$$

ภายใต้สภาวะความร้อน วัสดุจะเกิดการขยายตัวแบบถูกจำกัดรั้ง (Constrained Expansion) ก่อให้เกิดความเค้นทางความร้อนสะสมตาม [26] สมการที่ (7)

$$\sigma_{\text{thermal}} = E_{\theta} \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (7)$$

เมื่อ E_{θ} คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิ θ , $\alpha \approx 1.2 \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$ คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเหล็ก และ ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สำหรับการวิเคราะห์วัสดุเหนียวภายใต้สภาวะความเค้นหลายแกนโปรแกรม ANSYS ใช้ทฤษฎีพลังงานการบิดเบี้ยวสูงสุด (Maximum Distortion Energy Theory) หรือค่าความเค้นวอนมิเชส σ_v พิจารณาเกณฑ์การวิบัติของวัสดุ [27] ดังสมการที่ (8)

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (8)$$

เมื่อ σ_v คือ ความเค้นวอนมิเชส (MPa) และ σ_1, σ_2 และ σ_3 คือ ความเค้นหลักในแกนที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

กลไกการเกิดความเค้นทางความร้อนในโครงสร้างอชิบายได้ด้วยการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion) เมื่อวัสดุได้รับความร้อนและถูกจำกัดการขยายตัวจะเกิดความเค้นสะสม [28] ตามสมการที่ (9)

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T \quad (9)$$

เมื่อ ΔL คือ ระยะที่วัสดุขยายตัว (m) α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเหล็ก ($\sim 1.2 \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$) L คือ ความยาวเริ่มต้นของวัสดุ (m) ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

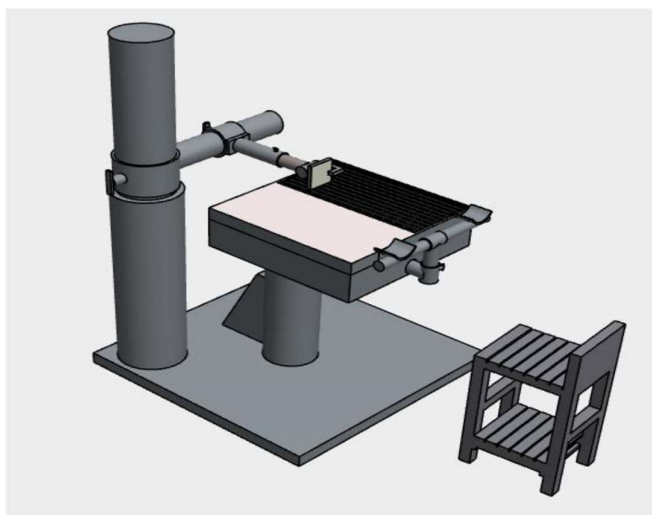
สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างเหล็กอาศัยกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's Law of Heat Conduction) ในสภาวะคงตัวหนึ่งมิติ Khaongam et al. [29]-[31] ดังสมการที่ (10)

$$q = kA(T_1 - T_2)/L \quad (10)$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W) k คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ ($\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$) A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2) T_1 คือ อุณหภูมิที่แหล่งกำเนิดความร้อน ($^{\circ}\text{C}$) T_2 คือ อุณหภูมิที่ปลายทาง ($^{\circ}\text{C}$) L คือ ระยะทางที่ความร้อนไหลผ่าน (m)

4.2 ขั้นตอนการจำลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลข

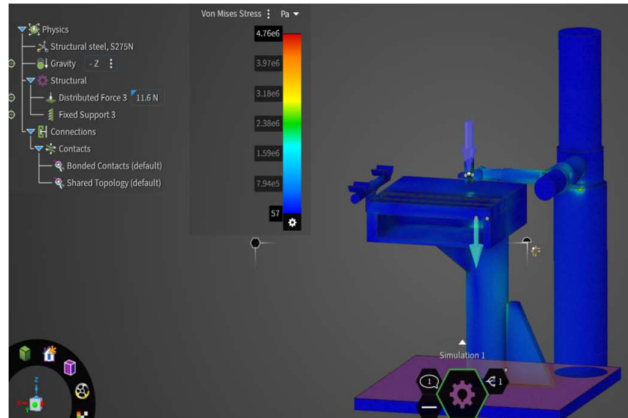
แบบจำลองสามมิติของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่งได้ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Shapr3D (ภาพที่ 1) จากนั้นส่งออกไฟล์ STEP เพื่อนำเข้าสู่โปรแกรม ANSYS สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 1 แบบจำลอง 3 มิติของแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่งได้

4.2.1 การสร้างโครงตาข่าย (Meshing) และการทดสอบความเป็นอิสระของโครงตาข่าย

แบบจำลองถูกแบ่งโครงตาข่ายใช้องค์ประกอบชนิด SOLID186 สำหรับการวิเคราะห์ที่โครงสร้างสถิต และ SOLID226 สำหรับการวิเคราะห์แบบฟิสิกส์ร่วม (coupled-field) ซึ่งรองรับทั้งองศาอิสระด้านการกระจัดและอุณหภูมิกำหนดขนาดพื้นฐานขององค์ประกอบ (element size) เท่ากับ 5 mm และทำการปรับแต่งเฉพาะจุด (local refinement) บริเวณหน้าแปลนจับยึด, จุดหมุนเพลาและร่องสไลด์ใช้ขนาด 1-2 mm เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณความเค้นสะสม (ภาพที่ 2) การทดสอบความเป็นอิสระของโครงตาข่าย (mesh independence study) กระทำตามแนวทางที่ได้รับการแนะนำสำหรับงานวิเคราะห์โครงสร้างเหล็ก [32] เปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดจากแบบจำลองที่มีขนาดองค์ประกอบ 5, 3 และ 1.5 mm ตามลำดับ ผลปรากฏว่าค่าความเค้นสูงสุดระหว่างแบบจำลองขนาด 3 mm และ 1.5 mm มีความแตกต่างกันน้อยกว่า 2% ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดองค์ประกอบหลัก 3 mm เพื่อความสมดุลระหว่างความถูกต้องและทรัพยากรการคำนวณจำนวนองค์ประกอบทั้งหมดที่ได้จากการสร้างโครงตาข่ายแบบละเอียดมีทั้งสิ้น 56,234 องค์ประกอบ และ 89,147 โหนด



ภาพที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง (Fixed Support และแรงกด 11.57 N)

4.2.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

กำหนดจุดยึดแบบ Fixed Support ที่บริเวณแผ่นฐาน (ภาพที่ 2) เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ทุกทิศทาง กำหนดแรงกดขนาด 11.57 N ที่หน้าแปลนจับยึดซึ่งแรงนี้มาจากการออกแบบสำหรับชิ้นงานที่มีมวล 1.18 kg ซึ่งรวมน้ำหนักของชิ้นงานและอุปกรณ์จับยึดส่วนปลายโดยกำหนดให้เป็นแรงกระจายบนพื้นที่สัมผัสของหน้าแปลนเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการหนีชิ้นงานจริงในกระบวนการเชื่อมที่หน้าแปลนจับยึดและเปิดใช้งานแรงโน้มถ่วงมาตรฐาน 9.81 m/s^2 สำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อนกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของโครงสร้างเท่ากับ 30°C และกำหนดการพาความร้อนบนพื้นผิวทั้งหมดค่าสัมประสิทธิ์ $10 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ที่อุณหภูมิแวดล้อม 30°C เพื่อจำลองการระบายความร้อนสู่อากาศค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวอ้างอิงจากการศึกษาเชิงตัวเลขที่ผ่านการทวนสอบกับการทดลอง [33] จากนั้นกำหนดอุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อนแบบแปรผัน (Temperature Sweep) ที่หน้าแปลนจับยึดตั้งแต่ 25 ถึง 450°C งานวิจัยนี้ได้นำเข้าสมบัติทางกลของเหล็ก S275 ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (Temperature-dependent Material Properties) ตามมาตรฐาน EN1993-1-2 (Eurocode 3) โดยค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) และความเค้นคราก (Yield Strength, f_y) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E) และความเค้นคราก (f_y) ของเหล็ก S275 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	มอดูลัสยืดหยุ่น E (GPa)	ค่าลดทอน E (E_θ/E_{20})	ความเค้นคราก f_y (MPa)	ค่าลดทอน f_y ($f_{y,\theta}/f_{y,20}$)
25	210	1.00	275	1.00
100	207	0.99	269	0.98
200	189	0.90	247	0.90
300	168	0.80	168	0.61
400	147	0.70	110	0.40
450	136	0.65	82	0.30

ที่มา: ปรับปรุงจากมาตรฐาน EN1993-1-2 Bijlaard, [20]

นอกจากสมบัติทางกลข้างต้นงานวิจัยนี้ยังได้นำเข้าสมบัติทางความร้อนของเหล็ก S275 ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) สภาพนำความร้อน(k) ความร้อนจำเพาะ (C_p) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (α) ดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อให้การวิเคราะห์แบบ Coupled-field มีความสมบูรณ์และสอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริง

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของเหล็ก S275 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น $\rho(\text{kg/m}^3)$	สภาพนำความร้อน $k (W/m \cdot ^\circ\text{C})$	ความร้อนจำเพาะ $C_p(\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C})$	สัมประสิทธิ์การขยายตัว $\alpha (\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$
25	7,850	50.0	450	12.0
100	7,850	48.0	470	12.5
200	7,850	45.0	500	13.0
300	7,850	42.0	530	13.5
400	7,850	39.0	560	14.0
450	7,850	37.0	580	14.5

ที่มา: อ้างอิงจากมาตรฐาน EN1993-1-2 และข้อมูลสมบัติวัสดุเหล็กโครงสร้าง [6], [26]

โปรแกรม ANSYS จะใช้ค่าจากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ในการปรับค่าความเค้นครากมอดูลัสยืดหยุ่น และสมบัติทางความร้อนตามอุณหภูมิแบบอัตโนมัติพร้อมทั้งปรับค่าความเค้นครากสำหรับการออกแบบตามอิทธิพลของความหนาวัสดุจากค่า nominal 275 MPa เหลือประมาณ 235-240 MPa ที่อุณหภูมิห้อง

การทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำโดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จาก ANSYS กับการคำนวณเชิงทฤษฎีตาม สมการที่ (11)

$$\%Error = \frac{Analytical - Numerical}{Analytical} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ %Error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%), Analytical คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎี และ Numerical คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงทฤษฎีกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดมีค่าเท่ากันที่ 4.76 MPa คิดเป็นความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.00 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความ

นำเชื่อถือทั้งนี้การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้ภาระทางกลเพียงอย่างเดียวด้วยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จาก ANSYS กับการคำนวณเชิงทฤษฎีซึ่งให้ความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.00 เนื่องจากผลลัพธ์หลักของงานวิจัยมาจากการวิเคราะห์แบบ Coupled Thermo-Mechanical ที่รวมภาระความร้อนด้วยการทดสอบในส่วนนี้จึงไม่ครอบคลุมผลกระทบจากอุณหภูมิโดยตรงซึ่งเป็นข้อจำกัดของการศึกษานี้เพื่อให้ได้ความน่าเชื่อถือสูงขึ้นควรทำการทดสอบแบบจำลองความร้อนร่วมกับการวัดอุณหภูมิจริงจากการทดลองในอนาคต

5.1.1 ผลการทดสอบความเป็นอิสระของโครงตาข่าย

การทดสอบความเป็นอิสระของโครงตาข่าย (Mesh Independence Study) เป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อยืนยันว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไม่ขึ้นอยู่กับความละเอียดของโครงตาข่ายและเพื่อให้ได้ขนาดองค์ประกอบที่เหมาะสมซึ่งให้ความสมดุลระหว่างความแม่นยำของผลการวิเคราะห์และทรัพยากรการคำนวณในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของโครงตาข่ายโดยเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิเซสสูงสุดจากแบบจำลองที่มีขนาดองค์ประกอบ 3 ระดับ ได้แก่ 5 mm, 3 mm และ 1.5 mm ตามแนวทางที่ได้รับการแนะนำสำหรับงานวิเคราะห์โครงสร้างเหล็ก [32] เกณฑ์การยอมรับกำหนดให้ความแตกต่างของความเค้นสูงสุดระหว่างแบบจำลองที่มีความละเอียดสูงกว่าต้องน้อยกว่า 2%

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบความเป็นอิสระของโครงตาข่ายด้วยขนาดองค์ประกอบ 5, 3 และ 1.5 mm พร้อมทั้งจำนวนองค์ประกอบและโหนด

ขนาดองค์ประกอบ (mm)	จำนวน Elements	จำนวน Nodes	ความเค้นสูงสุด (MPa)
5	12,345	21,678	4.72
3	56,234	89,147	4.76
1.5	189,456	280,123	4.77

ผลปรากฏว่าความเค้นสูงสุดระหว่างขนาด 3 mm และ 1.5 mm แตกต่างกันเพียง 0.21% ต่ำกว่าเกณฑ์ 2% ในขณะที่จำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นประมาณ 3.37 เท่าดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดองค์ประกอบหลัก 3 mm เพื่อความสมดุลระหว่างความแม่นยำและทรัพยากรการคำนวณ

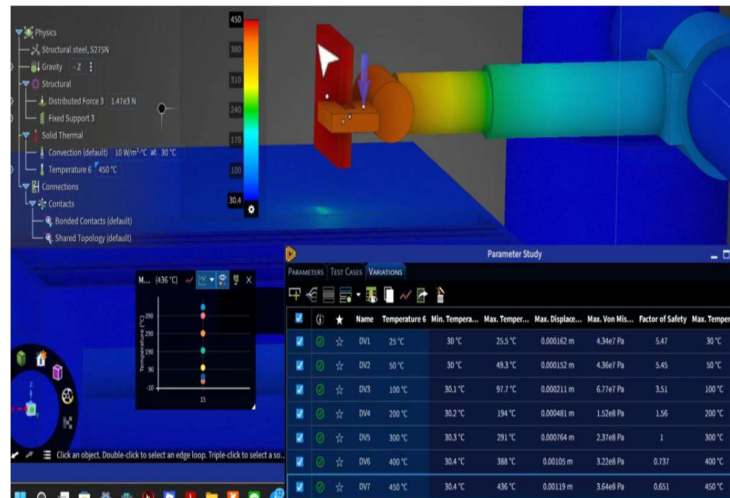
5.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากภาระความร้อนร่วม

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความเค้นสูงสุดและค่าความปลอดภัยของโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความเค้นสูงสุดและค่าความปลอดภัย

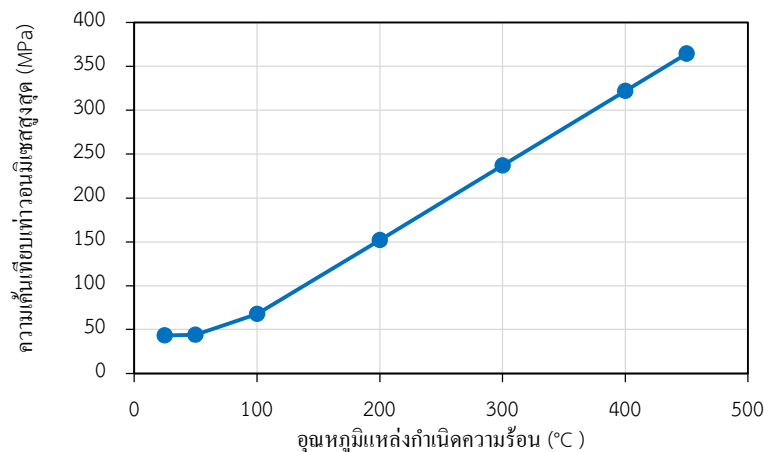
อุณหภูมิแหล่งกำเนิด(°C)	อุณหภูมิที่ปากกาจับงาน(°C)	ความเค้นสูงสุด(MPa)	ค่าความปลอดภัย(F.S.)
25	25.48	43.38	6.34
50	49.34	44.00	6.18
100	97.69	68.00	3.96
200	194.38	152.00	1.63
300	291.08	237.12	0.71
400	387.78	322.00	0.34
450	436.13	364.45	0.22

การกระจายอุณหภูมิบนโครงสร้าง (ภาพที่ 3) แสดงการไล่ระดับอุณหภูมิอย่างชัดเจนอุณหภูมิสูงสุด 450°C อยู่ที่หน้าแปลนจับยึดและลดลงเหลือประมาณ 30 ถึง 40°C ที่ฐานรองรับเนื่องจากการพาความร้อนสู่อากาศสอดคล้องกับกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์

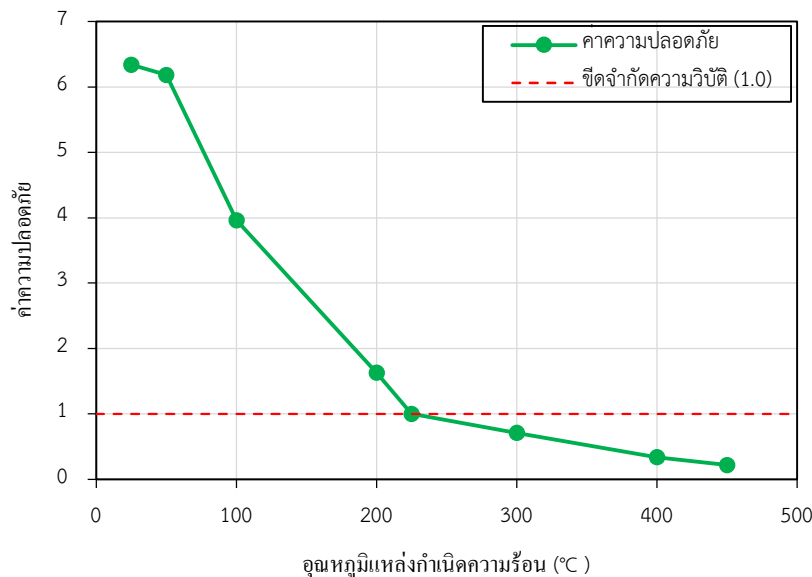


ภาพที่ 3 การกระจายอุณหภูมิบนโครงสร้างแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อม

ความเค้นเทียบเท่าอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้นจาก 43.38 MPa ที่ 25 °C เป็น 364.45 MPa ที่ 450 °C (ภาพที่ 4) ค่าความปลอดภัยลดลงจาก 6.34 ที่ 25 °C เหลือ 1.63 ที่ 200 °C และลดลงต่ำกว่า 1.00 เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าประมาณ 255 °C (ภาพที่ 5) ที่อุณหภูมิ 300 °C โครงสร้างมีค่าความปลอดภัยเพียง 0.71 ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างเกิดการเสียรูปถาวร (Plastic Collapse) ไปแล้วตั้งแต่มาก่อนถึง 300 °C โดยจุดเปลี่ยนผ่านที่โครงสร้างมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.00 อยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 255 °C ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของสมบัติวัสดุที่รายงานในงานวิจัยของ Outinen และ Mäkeläinen [18] ที่ศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของเหล็ก S275 ที่อุณหภูมิ 20-450 °C



ภาพที่ 4 แนวโน้มของความเค้นเทียบเท่าอุณหภูมิสูงสุดจากการวิเคราะห์แบบ Coupled-field



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความปลอดภัยของโครงสร้าง
(จุดตัด F.S.=1.00 ที่อุณหภูมิประมาณ 255 °C)

จากการวิเคราะห์แบบฟิสิกส์ร่วมพบว่าความเค้นสูงสุดพุ่งจาก 43.38 MPa ที่ 25 °C เป็น 364.45 MPa ที่ 450 °C ขณะที่ค่าความปลอดภัยลดลงอย่างรวดเร็วจาก 6.34 เหลือ 0.22 แนวโน้มการลดลงของสมบัติวัสดุที่รายงานใน [34] จุดเปลี่ยนผ่านสำคัญที่ประมาณ 255 °C (F.S.=1.00) เมื่ออุณหภูมิเกิน 255 °C ค่าความปลอดภัยลดลงต่ำกว่า 1.00 (0.34 ที่ 400 °C, 0.22 ที่ 450 °C) แสดงถึงความเสี่ยงต่อการเสียรูปถาวรเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Outinen และ Mäkeläinen [18] ที่ศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของเหล็ก S275 ที่อุณหภูมิ 20-450 °C

6. อภิปรายผล

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าภาระทางความร้อนมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้างมากกว่าภาระทางกลอย่างมีนัยสำคัญ ที่อุณหภูมิห้องโครงสร้างออกแบบมาอย่างปลอดภัยสูง (Over-engineered) ด้วยค่าความปลอดภัยมากกว่า 49 แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการขยายตัวทางความร้อนถูกจำกัดด้วยจุดยึดแบบ Fixed Support และน้ำหนักชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในโครงสร้าง กลไกการเกิดความเค้นทางความร้อนนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $\sigma = E\alpha\Delta T$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเค้นทางความร้อนเป็นฟังก์ชันของมอดูลัสยืดหยุ่น (E) สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (α) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) กลไกการเพิ่มขึ้นของความเค้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นการเพิ่มขึ้นของความเค้นจาก 43.38 MPa ที่ 25 °C เป็น 364.45 MPa ที่ 450 °C (เพิ่มขึ้น 8.4 เท่า) มีสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติวัสดุตามอุณหภูมิสองประการ ประการแรก มอดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก S275 ลดลงจาก 210 GPa เหลือ 136 GPa (ลดลง 35%) ตามมาตรฐาน EN1993-1-2 ที่อุณหภูมิ 300 °C เหลือเพียง 80% ของค่าที่อุณหภูมิห้องประการที่สองสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นจาก $12.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ เป็น $14.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงทั้งสองประการนี้ทำให้เกิด Coupling Effect ระหว่างสนามความร้อนและสนามความเค้นตามทฤษฎี Thermoelasticity [28] อธิบายว่าเมื่อวัสดุได้รับความร้อนและถูกจำกัดการขยายตัวจะเกิดความเค้นสะสมแบบไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. [6] ที่รายงานว่าสมบัติเชิงกลของเหล็กโครงสร้างเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C กลไกการลดลงของค่าความปลอดภัย พบว่าโครงสร้างจะเข้าสู่ภาวะ Limit State (F.S.=1.00) ที่อุณหภูมิประมาณ 255 °C ซึ่งเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดในโครงสร้างมีค่าเท่ากับค่าความเค้นคราก (f_y) ที่ลดลงตามอุณหภูมิ ณ ขณะนั้นโดยตำแหน่งจุดเปลี่ยนผ่านนี้สามารถหาได้จากการประมาณค่าเชิงเส้น (Linear Interpolation) ระหว่างอุณหภูมิ 200 °C (F.S.= 1.63) และ 300 °C (F.S.=0.71) ให้ค่าเท่ากับ 255 °C ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 300 °C ให้ค่าความเค้นสูงสุด (237.12 MPa) สูงกว่าค่าความเค้นครากที่ลดลง (168 MPa) เป็นอย่างมากส่งผลให้มีค่าความปลอดภัยเพียง 0.71 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเกิดการเสียรูปถาวร (Plastic Collapse) ไปแล้วตั้งแต่ก่อนถึง 300 °C ดังนั้นจุดเปลี่ยนผ่านที่แท้จริงจึงอยู่ที่ประมาณ 255 °C ซึ่งต่ำกว่า 300 °C ที่งานวิจัยก่อนหน้านี้บางฉบับรายงานไว้เนื่องจากข้อจำกัดทางความร้อนจากจุดยึดแบบ Fixed Support ที่เข้มงวดกว่าและการเสื่อมสภาพของสมบัติเชิงกลของเหล็กโครงสร้างตามอุณหภูมิสอดคล้องกับมาตรฐาน EN1993-1-2 [20] และงานวิจัยของ Outinen และ Mäkeläinen [18] พบว่าจุดเปลี่ยนผ่านสำคัญของเหล็กโครงสร้างอยู่ที่ประมาณ 300-350 °C แต่เมื่อพิจารณาจากการศึกษานี้พบว่าขีดจำกัดทางความร้อนที่แท้จริงของโครงสร้างแขนจับยึดอยู่ที่ประมาณ 255 °C ซึ่งต่ำกว่าค่าดังกล่าวเนื่องจากความเค้นจากการขยายตัวทางความร้อนที่ถูกจำกัดด้วยจุดยึดแบบ Fixed Support

ตำแหน่งวิกฤตและการรวมความเค้นจากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าตำแหน่งวิกฤตที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่บริเวณจุดหมุนเพลลา (Shaft Rotation Point) และบริเวณรอยต่อระหว่างหน้าแปลนจับยึดกับแขนหมุนเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างรวดเร็ว (Geometric Discontinuity) ร่วมกับเป็นจุดที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดจากการรับแรงเหวี่ยงศูนย์กลางนอกจากนี้การมีร่องสไลด์และรูยึดในบริเวณดังกล่าวยังทำ

หน้าที่เป็น Stress Raiser ทำให้เกิดการรวมความเค้น (Stress Concentration) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางกลศาสตร์ของวัสดุที่ความเค้นมักจะสะสมบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเรขาคณิตอย่างฉับพลัน [24] โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการขยายตัวทางความร้อนถูกจำกัดด้วยจุดยึดแบบ Fixed Support ที่ฐานทำให้เกิดความเค้นอัดสะสมเพิ่มเติมในแนวแกนส่งผลให้ความเค้นรวมที่จุดวิกฤตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี Maximum Distortion Energy Theory (Von Mises Criterion) [27] ตามเกณฑ์ที่โปรแกรม ANSYS ใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินการวิบัติของวัสดุเหนียวภายใต้สภาวะความเค้นหลายแกน

การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าจุดวิกฤตที่ประมาณ 255 °C มีแนวโน้มสอดคล้องกับที่รายงานจาก Pantousa และ Karavasilis [34] ศึกษาการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) ของเหล็กโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงและพบว่าค่าความปลอดภัยลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเกิน 250 °C ขณะที่ Zhang et al. [35] ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมกลและการแตกหักของรอยเชื่อม โดยเฉพาะเมื่อวัสดุได้รับความร้อนสะสมบริเวณจุดหมุนและหน้าสัมผัสการวิเคราะห์แบบ Coupled-field ที่พิจารณาทั้งการกระจายความร้อนและการทางกลพร้อมกันให้ข้อมูลที่สมจริงกว่าการวิเคราะห์แยกส่วน (Uncoupled Analysis) เป็นอย่างมากเฉพาะในกรณีของอุปกรณ์จับยึดงานเชื่อมที่ต้องเผชิญกับสภาวะเทอร์โมกลศาสตร์ที่ซับซ้อนผลการวิจัยจึงเป็นแนวทางสำคัญสำหรับวิศวกรในการประเมินความปลอดภัยและกำหนดช่วงเวลาพักเพื่อการระบายความร้อนในกระบวนการเชื่อมจริงทางวิศวกรรมผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญต่อการออกแบบอุปกรณ์จับยึดงานเชื่อมในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากแสดงให้เห็นว่า Critical Temperature ที่ประมาณ 255 °C เป็นขีดจำกัดปฏิบัติการที่ต้องควบคุมซึ่งสอดคล้องกับหลัก Safety Factor Design Philosophy [25] ในทางวิศวกรรมโครงสร้างการกำหนดเกณฑ์นี้ช่วยลดความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของโครงสร้าง (Structural Failure) และเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน (Operational Safety) ยิ่งในกรณีของอุตสาหกรรมที่กระบวนการเชื่อมต้องดำเนินการต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่าการศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากแบบจำลองความร้อนใช้สมมติฐานอุณหภูมิคงที่ (Steady-state Assumption) ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 10 W/m²·°C อ้างอิงจากรวบรวมของ Bezerra et al. [33] ทั้งนี้ในกระบวนการเชื่อมจริงอุณหภูมิที่หน้าแปลนจะแปรผันตามเวลาและระยะห่างจากอาร์กดังนั้นผลการวิเคราะห์นี้จึงควรถูกมองว่าเป็นแนวโน้มเชิงคุณภาพ (Qualitative Trend) เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบ การกำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิที่ประมาณ 255 °C หรือไม่เกิน 250 °C สำหรับการใช้งานจริงยังคงมีประโยชน์ในเชิงปฏิบัติหากแต่ต้องการความแม่นยำสูงขึ้นการศึกษานในอนาคตควรพิจารณาแบบจำลอง Transient Coupled-field ร่วมกับการวัดอุณหภูมิจริงจากการทดลอง

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

โครงสร้างแขนจับยึด S275 มีความแข็งแรงสูงภายใต้ภาระกลเพียงอย่างเดียว F.S. = 49.8 ความเค้นสูงสุด = 4.76 MPa ภาระความร้อนส่งผลให้ความเค้นเพิ่มขึ้นไม่เป็นเชิงเส้นและค่าความปลอดภัยลดลงอย่าง

รวดเร็วขีดจำกัดอุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้โครงสร้างเริ่มเปลี่ยนจากสถานะปลอดภัยไปสู่สถานะวิกฤต ($F.S.=1.00$) อยู่ที่ประมาณ $255\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่าค่าที่คาดการณ์ไว้ในเบื้องต้น ($300\text{ }^{\circ}\text{C}$) หากเกินอุณหภูมินี้โครงสร้างจะเสี่ยงต่อการเสียรูปถาวรอย่างเด่นชัดเนื่องมาจากค่าความเค้นครากของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้ การจำลองในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำสูงโดยมีความคลาดเคลื่อนของความเค้นร้อยละ 0.00 เมื่อเทียบกับการคำนวณเชิงทฤษฎี

7.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้งานจริงควรควบคุมอุณหภูมิสะสมที่หน้าแปลนจับยึดไม่ให้เกิน $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อรักษาค่า $F.S. > 1.00$ ตามเกณฑ์การออกแบบ [25] ควรเว้นช่วงพักระบายความร้อนเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าค่านี้รวมถึงใช้สารหล่อลื่นทนความร้อนสูงบริเวณแกนเพลลาเพื่อลดแรงเสียดทานและการสะสมความร้อนเฉพาะจุด

การวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาการรับภาระแบบซ้ำ (Cyclic Loading) เพื่อประเมินความล้าของวัสดุ ภายใต้สภาวะเทอร์โมกลศาสตร์จำลองสภาวะอุณหภูมิแบบไม่คงตัว (Transient Thermal Analysis) ที่สามารถจับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบชั่วขณะและการเคลื่อนที่ของแหล่งความร้อนในกระบวนการเชื่อมจริงและสร้างต้นแบบจริงเพื่อทดสอบผลเชิงประจักษ์ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและสเตรนเกจเพื่อวัดอุณหภูมิและความเค้นจริงในระหว่างกระบวนการเชื่อมนอกจากนี้ควรศึกษาอิทธิพลของวัสดุทางเลือกอื่น เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High-Strength Steel) หรือการออกแบบทางเรขาคณิตใหม่เพื่อลดความเข้มข้นของความเค้นที่จุดวิกฤต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยลำดับที่ 1 ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กิตติพล ขาวงาม ที่ปรึกษางานวิจัยที่ได้กรุณาเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการสร้างแขนจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบปรับตำแหน่งได้รวมถึงเป็นผู้จุดประกายแนวคิดในการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบวิเคราะห์และคำนวณตามหลักวิชากลศาสตร์ของแข็งและการออกแบบซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้อีกทั้งยังให้คำแนะนำกำกับดูแลทิศทางการและให้การสนับสนุนทางวิชาการตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยด้วยดีเสมอมาผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คำแถลงบทบาทและส่วนร่วมของผู้เขียน

ศุภวิชญ์ พิชัย; สร้างแบบจำลอง 3 มิติ กำหนดสภาวะจำลองและดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ด้วย ANSYS เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลผลการจำลอง และร่วมเขียนต้นฉบับบทความ

กิตติพล ขาวงาม; กำหนดแนวคิดและออกแบบระเบียบวิธีวิจัย ออกแบบกรอบการวิเคราะห์เทอร์โม-กลศาสตร์ร่วม คำนวณเชิงทฤษฎีเพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ตรวจสอบและแก้ไขต้นฉบับ กำกับดูแลทิศทางการ และบริหารจัดการวิจัย ผู้เขียนทุกคนได้อ่านและอนุมัติต้นฉบับบทความฉบับสุดท้าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Da Rosa, A. F., Quintana, D. S., Marinho, R. R., Schwedersky, M. B., & Gonçalves e Silva, R. H. (2026). Stud welding process: A comprehensive literature review of fundamentals, recent advances, and industrial perspectives. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 142(3), 1055–1097. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-17040-2>
- [2] Zhao, S., Chen, J., & Chan, T.-M. (2026). Effect of welding on behaviours of high strength steel welded joints: A state-of-the-art review. *Structures*, 84, 111002. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.111002>
- [3] Wahidi, S. I., Oterkus, S., Oterkus, E., Supomo, H., & Pribadi, T. W. (2025). Structural optimisation for minimising weight and welding in confined shipbuilding spaces: Enhancing safety and reducing costs. *Ocean Engineering*, 341, 122779. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122779>
- [4] Arnaoutis, V., Rosić, B. V., & Lutters, E. (2023). Parametric design evolution for production setups: A case study for welding fixtures. *Procedia CIRP*, 120, 1522–1527. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.208>
- [5] Das, A., Kumar, A., Shankhwar, K., & Gubeljak, N. (2022). A review of heat source and resulting temperature distribution in arc welding. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(23), 12975–13010. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11589-w>
- [6] Li, Y., Wang, M., Li, G., & Jiang, B. (2021). Mechanical properties of hot-rolled structural steels at elevated temperatures: A review. *Fire Safety Journal*, 119, 103237. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103237>
- [7] Khaongam, K., & Srihajong, N. (2015). Heat transfer characteristics of thermo-syphon: Case study of modifying inclination angle of evaporator and condenser sections. *Food Agricultural Sciences and Technology*, 1(2), 57–62. <https://doi.org/10.14456/randk.2015.9>
- [8] Muránsky, O., Smith, M. C., Bendeich, P. J., Holden, T. M., Luzin, V., Martins, R. V., & Edwards, L. (2012). Comprehensive numerical analysis of a three-pass bead-in-slot weld and its critical validation using neutron and synchrotron diffraction residual stress measurements. *International Journal of Solids and Structures*, 49(9), 1045–1062. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.07.006>
- [9] Nie, L., He, D., Lei, W., Chen, D., Zhao, L., & Xiao, Q. (2026). A temperature-adaptive enhanced thermomechanical model for friction stir welding: Interfacial slip

- quantification, tool loads coupling, and asymmetric residual stress mechanism. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.02.011>
- [10] Sun, Y., Zhu, Y., Jin, H., Wei, Y., Liu, X., Gao, Y., & Chu, J. (2025). Analysis of factors influencing stress and deformation in tungsten inert gas welding of complex thin-walled combustion liners via finite element model. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-12833-8>
- [11] Bercelli, L., Levieil, B., Doudard, C., Malek, B., Bridier, F., & Ezanno, A. (2023). Use of infrared thermography to model the effective stress ratio effect on fatigue crack growth in welded T-joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 279, 109061. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109061>
- [12] Venkatachari, S., & Kodur, V. (2023). Modeling parameters for predicting the fire-induced progressive collapse in steel framed buildings. *Resilient Cities and Structures*, 2(3), 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2023.10.003>
- [13] Anual, M., Sahroni, T., Akmal, S., & Nasution, F. (2018). Transient thermal analysis of welding fixtures design. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 195(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/195/1/012042>
- [14] Liu, C., & Zhang, J. (2009). Investigation of external restraining force effects on welding residual stresses using three-dimensional thermal elastic-plastic multi-body coupling finite element model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(12), 1591–1600. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1548>
- [15] Gong, X., Cheng, G., Zhang, Q., Li, Z., & Nie, Y. (2025). Structural shakedown analysis considering temperature-dependent yield stress and varying thermomechanical loads based on data-driven FEM cluster-based basis reduction method. *Engineering Structures*, 341, 120815. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120815>
- [16] Khaongam, K., & Khampong, P. (2026). Experimental investigation of the heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon under different inclination angles and filling ratios using dimensionless analysis. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 29–56. <https://doi.org/10.14456/brujit.2026.3>
- [17] Kelly, F., & Sha, W. (1999). A comparison of the mechanical properties of fire-resistant and S275 structural steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 50(3), 223–233. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00252-1](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00252-1)
-

- [18] Outinen, J., & Mäkeläinen, P. (2004). Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down. *Fire and Materials*, 28(2–4), 237–251. <https://doi.org/10.1002/fam.849>
- [19] Kim, H. J., Lee, C.-H., Cho, Y., & Park, M. J. (2025). Post-fire residual yield strength and ultimate strength of structural steel SS275 considering load ratios. *Journal of Constructional Steel Research*, 234, 109745. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109745>
- [20] Bijlaard, F. (2008). Eurocode 3: Design of steel structures—Present status and further developments. *Steel Construction*, 1(1), 16–23. <https://doi.org/10.1002/stco.200890000>
- [21] Torić, N., Harapin, A., & Boko, I. (2015). Modelling of the influence of creep strains on the fire response of stationary heated steel members. *Journal of Structural Fire Engineering*, 6(3), 155–176. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.6.3.155>
- [22] Thanoi, K., Naksungnoen, W., Buapa, P., & Khaongam, K. (2026). Development of a hydraulic press-based flat steel bar cutting system. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 13–28. <https://doi.org/10.14456/brujit.2026.2>
- [23] Meriam, J. L., Kraige, L. G., & Bolton, J. N. (1975). *Statics*. Wiley.
- [24] Pytel, A., & Kiusalaas, J. (2012). *Mechanics of materials*. Cengage Learning.
- [25] Bhandari, V. (2010). *Design of machine elements*. Tata McGraw-Hill Education.
- [26] Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.
- [27] Martyushev, S., & Dement'Ev, A. (2018). Three-dimensional modelling of external mechanical effects on devices and machinery in SolidWorks Simulation. *Siberian Journal of Science and Technology*, 19(1), 82–97. <https://doi.org/10.31772/2587-6066-2018-19-1-82-97>
- [28] Boley, B. A., & Weiner, J. H. (2012). *Theory of thermal stresses*. Courier Corporation.
- [29] Khaongam, K., Chompookham, T., & Parametthanuwat, T. (2025). Internal flow pattern of the condenser section that affects the heat transfer characteristics of rectangular two-phase closed thermosyphon. *Case Studies in Thermal Engineering*, 72, 106246. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106246>
- [30] Bergman, T. L. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- [31] Khaongam, K., Srihajong, N., Seahang, K., & Pratoomchat, P. (2014). *Thermal performance of closed-loop oscillating heat pipes with check valves using AgNO₃/distilled water*

nanofluids. In *The 6th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI 2014)*.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33101.74728>

- [32] Abambres, M., & Arruda, M. R. (2016). Finite element analysis of steel structures—A review of useful guidelines. *International Journal of Structural Integrity*, 7(4), 490–515. <https://doi.org/10.1108/IJSI-07-2015-0020>
- [33] Bezerra, A. C., Rade, D. A., & Scotti, A. (2005). *Finite element simulation of TIG welding: Thermal analysis*. In *Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*.
- [34] Pantousa, D., & Karavasilis, T. (2021). Experimental and numerical investigation of the ductile fracture of structural steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 177, 106444. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106444>
- [35] Zhang, W., Yang, Q., Yin, P., Zhang, G., Xia, X., Zhao, Y., & Zhou, C. (2022). Thermomechanical fatigue and fracture behaviours of welded joints at various temperatures. *Engineering Fracture Mechanics*, 271, 108644. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108644>