



การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและทดลองของกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์สำหรับประเมิ การบิดเสียรูปและความเค้นตกค้างในชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กกล้า

นฤตม ขจรวุฒิตระกูล

นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์*

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8315 อีเมล: csw@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.01.001

รับเมื่อ 26 ตุลาคม 2558 ตอรับเมื่อ 6 มกราคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 23 กันยายน 2559

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนและการเสียรูปของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขกอร์กับดำเนินการทดลองไปพร้อมๆ กัน ข้อดีของการคำนวณแบบแยกส่วนและแบบคู่ควบของโมดูลเชิงอุณหภูมิและเชิงกลได้ถูกตรวจสอบเชิงลึกโดยกระทำการพิจารณาเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิและการตอบสนองพลวัตของคุณลักษณะเชิงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างช่วงเวลาการเชื่อม แบบจำลองเชิงทฤษฎีสำหรับแหล่งกำเนิดความร้อนรูปทรงรีตันซ้อนทับกันของโกลดักถูกนำมาปรับใช้งานให้คล้ายคลึงกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดตามแนวรอยเชื่อม ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับรูปทรงแหล่งกำเนิดความร้อนนี้กระทำการบนพื้นฐานของโปรแกรมการทดลองซึ่งถูกออกแบบให้ครอบคลุมกลุ่มของพารามิเตอร์งานเชื่อมที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมสืบเนื่องจากผลการคำนวณ พบว่าการคำนวณแบบแยกส่วนและแบบคู่ควบของโมดูลเชิงอุณหภูมิและเชิงกลให้ผลลัพธ์การตอบสนองพลวัตเชิงอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม เทคนิคการคำนวณแบบแยกส่วนมีข้อดีประการสำคัญคือใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า ดังนั้นจึงจัดเป็นระเบียบวิธีการคำนวณที่ประหยัด นอกจากนี้การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง แสดงให้ทราบถึงความสอดคล้องกันทั้งขนาดรอยเชื่อม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชิ้นงานและการโก่งตัวถาวรของชิ้นงาน โดยความคลาดเคลื่อนของการโก่งตัวชิ้นงานโครงสร้างภายหลังการเชื่อมอยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้สำหรับการเชื่อมทั้งสองกรณี แบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอนี้จึงสามารถนำไปประเมินการกระจายความเค้นตกค้างและการบิดตัวโดยรวมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมใต้ฟลักซ์ซึ่งจัดเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีอัตราการป้อนพลังงานความร้อนสูงได้

คำสำคัญ: การเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ ขั้นตอนการคำนวณเชิงอุณหภูมิและเชิงกล แบบจำลองแหล่งกำเนิดความร้อนของโกลดัก

การอ้างอิงบทความ: นฤตม ขจรวุฒิตระกูล และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์, “การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและทดลองของกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์สำหรับประเมินการบิดเสียรูปและความเค้นตกค้างในชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กกล้า,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, หน้า 395-413, ก.ย.-ธ.ค. 2559



Numerical and Experimental Analysis of Submerged Arc Welding Process for Assessing Distortions and Residual Stresses in Steel Structural Member

Nareudom Khajohnvuttitragoon

Student, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Chinarong Srikunwong*

Assistant Professor, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8315, E-mail: csw@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.01.001

Received 26 October 2015; Accepted 6 January 2016; Published online: 23 September 2016

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research is aimed to study thermal distribution and deformation of workpiece fabricated by Submerged Arc Welding process (SAW) using numerical modeling along with welding experiment. Benefit of uncoupled and coupled thermo-mechanical computational procedure was profoundly investigated and compared in terms of temperature distribution and dynamic response of thermal characteristics during welding process. The Goldak's double-ellipsoidal heat source model was adopted as a moving heat source in a similar way to the motion of electrode along the weld bead. Determination of geometric parameters for such a heat source model was carried out and based on a series of experiment programs which were designed to cover a given set of applicable welding parameters using in the industry. According to computational results, it is disclosed that both fully coupled and uncoupled thermo-mechanic procedure yield similar results for dynamic thermal response. However, the latter technique offers a remarkable benefit since it requires less calculation time, and thus relative cost-saving procedure. In addition, validation made between computational result and that of experiment shows a good agreement in the weld bead dimension, thermal history, and permanent distortion in the workpiece. The discrepancy of plastic distortion in welded structure is relatively admissible for both cases. This proposed numerical model is capable of providing an effective assessment of residual stress distribution and global distortion of such a workpiece undergone high rate of thermal energy input of SAW process.

Keywords: Submerged Arc Welding, Thermo-mechanical Computation Procedure, Goldak's Heat Source Model

Please cite this article as: N. Khajohnvuttitragoon and C. Srikunwong, "Numerical and experimental analysis of submerged arc welding process for assessing distortions and residual stresses in steel structural member," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 26, no. 3, pp. 395-413, Sep.-Dec. 2016 (in Thai).

1. บทนำ

การเชื่อมแบบใต้อาร์ค (SAW: Submerged Arc Welding) เป็นวิธีการเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถเชื่อมได้เร็วมาก การซึมลึกสูง แนวเชื่อมสวยงามและมีคุณภาพ ส่วนใหญ่จะควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการเดินแนวเชื่อมที่เป็นเส้นตรงยาว และชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมมีความหนา โดยการเชื่อมแบบใต้อาร์คนั้นมีการเชื่อมระหว่างทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเปลือย จะมีการป้อนฟลักซ์ลงไปห่อหุ้มรอบๆ ลวดเชื่อมเอาไว้ไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของอากาศภายนอกเข้าสู่เนื้อโลหะ เมื่อความร้อนจากการอาร์กทำให้เกิดบ่อหลอมขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ฟลักซ์บางส่วนจะละลายสิ่งเจือปนในเนื้อโลหะให้เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ผิว เมื่อเย็นตัวลงฟลักซ์ที่ผิวหน้าจะแข็งตัวห่อหุ้มแนวเชื่อมไว้อีกหนึ่งชั้น

ในระหว่างกระบวนการเชื่อม ชิ้นงานจะได้รับความร้อนสูง เพื่อให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อวัสดุ ซึ่งจะเกิดพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นเมื่อชิ้นงานมีความแตกต่างกันมาก การขยายตัวอุณหภาพ (Thermal Expansion) ที่ไม่เท่ากัน เมื่อชิ้นงานเย็นตัวจะก่อให้เกิดความเค้น (Stress) ในเนื้อวัสดุ ซึ่งถ้าเกิดความเค้นมากเกินไปจนจุดครากตัว (Yield Point) ของวัสดุ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลาสติกและทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในเนื้อวัสดุตามมา

ความเค้นตกค้าง คือ ความเค้นที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ โดยไม่ต้องมีแรงภายนอกกระทำ เมื่อนำชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างไปใช้งาน ชิ้นงานจะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากรับภาระได้ลดลง หรือหากมีแรงจากภายนอกทำให้เกิดความเค้นเพิ่มขึ้น เมื่อรวมกับความเค้นตกค้างเดิมอาจจะทำให้เกิดความเค้นเกินกว่าที่คาดการณ์ไว้ นำมาซึ่งความเสียหายวิบัติของชิ้นงานได้ [1] การวิเคราะห์กระบวนการเชื่อมแบบใต้อาร์คด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถทำให้ทราบถึงลักษณะของการเปลี่ยนรูปภายหลังจากผ่านกระบวนการเชื่อม กอปรกับความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น

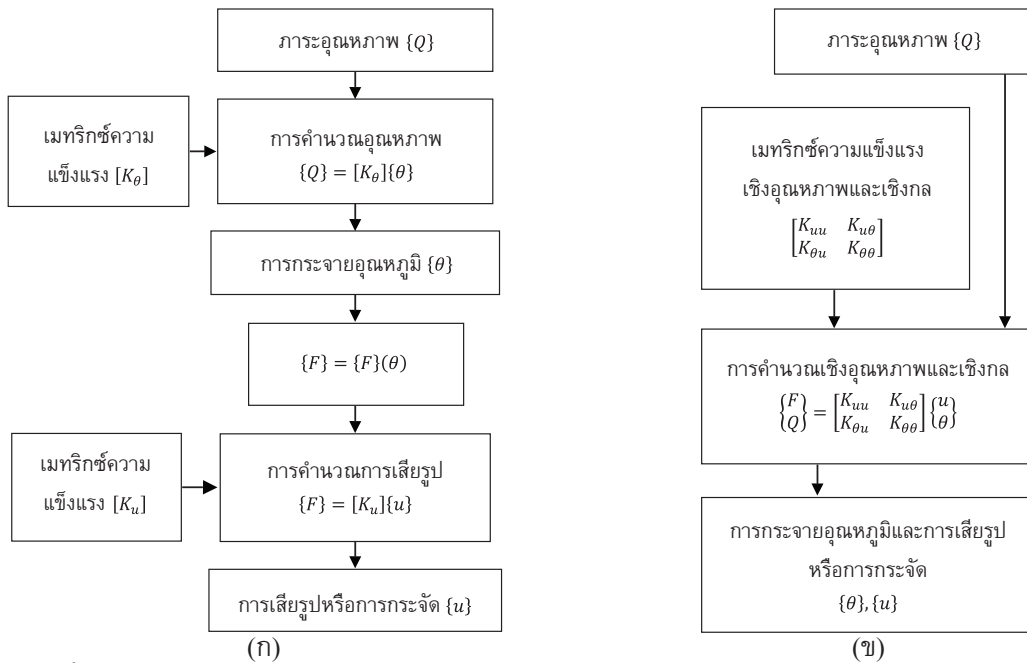
ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางปรับปรุงแก้ไขลดการเปลี่ยนรูป ลดความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการเชื่อม รวมไปถึงนำไปประกอบการตัดสินใจปรับค่าตัวแปรต่างๆ ของงานเชื่อมได้

2. การจำลองกระบวนการเชื่อมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิหรือขนาดการเสียรูปนั้น จะทำให้สามารถลดจำนวนการทดลองเพื่อทราบขนาดและแนวโน้มของการเสียรูปจากกระบวนการเชื่อมลงได้ โดยรูปแบบของกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เลือกใช้จะเป็นการวิเคราะห์แบบแยกส่วนระหว่างโมดูลอุณหภาพและโมดูลเชิงกล (Uncoupled Thermo-mechanical Analysis) ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถคำนวณได้รวดเร็วกว่าการคำนวณเชิงอุณหภาพและเชิงกลควบคู่กัน (Fully-coupled Thermo-mechanical Analysis) และสามารถนำข้อมูลอุณหภูมิไปใช้ในแบบจำลองเชิงกลต่อได้หลายแบบจำลองโดยไม่ต้องดำเนินการคำนวณอุณหภูมิใหม่ จากข้อดีของการคำนวณแบบแยกส่วนเชิงอุณหภาพและเชิงกลดังกล่าว ทำให้วิธีนี้ได้รับความนิยมในการจำลองกระบวนการเชื่อมค่อนข้างแพร่หลาย อาทิ Argyris [2] ใช้วิธีคำนวณแบบแยกส่วนเพื่อลดเวลาในการคำนวณ Friedman [3] อ้างว่าการคำนวณแบบคู่ควบกันไม่มีความจำเป็นเท่าใดนัก เนื่องจากส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ไม่เด่นชัด

โดยระเบียบวิธีวิจัยสำหรับสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปร่างของชิ้นงานเชื่อมมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการเชื่อมแบบใต้อาร์ค
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับขนาดชิ้นงาน สมบัติวัสดุและพารามิเตอร์งานเชื่อมมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม
3. เลือกรูปแบบแหล่งกำเนิดความร้อนที่เหมาะสมและกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของแหล่งกำเนิดความร้อนให้สอดคล้องกับงานเชื่อมจริง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) Uncoupled Thermo-mechanical Computational Scheme (ข) Fully-coupled Thermo-mechanical Computational Scheme

4. นำข้อมูลในข้อ 3 มาใช้เป็นอินพุตของแบบจำลองเชิงตัวเลขในส่วนโมดูลอุณหภูมิ เพื่อคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิในชิ้นงานซึ่งแปรผันกับเวลา

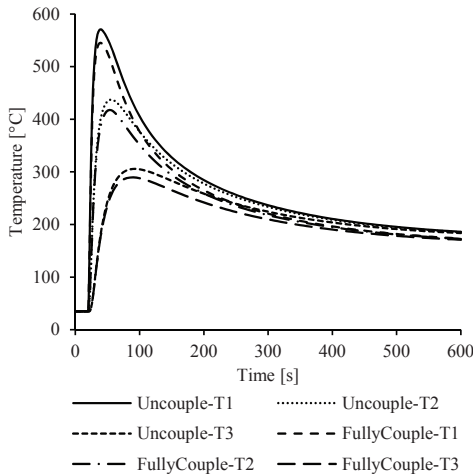
5. นำผลลัพธ์อุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลามาเป็นภาระอุณหภูมิสำหรับการคำนวณโมดูลเชิงกล เพื่อคำนวณการเสียรูปและการกระจายความเค้นสุดท้ายในชิ้นงาน

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิและการวิเคราะห์เชิงกล

2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณแบบแยกส่วนโมดูลเชิงอุณหภูมิและโมดูลเชิงกล

ขั้นตอนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบแยกส่วนระหว่างโมดูลเชิงอุณหภูมิและเชิงกล จะทำการคำนวณการกระจายอุณหภูมิแยกส่วนกับการเสียรูปของวัสดุก่อน โดยเมื่อคำนวณได้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาแล้ว จึงนำอุณหภูมินั้นไปกำหนดเป็นเงื่อนไขขอบเขตของ

การคำนวณเชิงกลดังรูปที่ 1 วิธีนี้สามารถคำนวณการเกิดความร้อนได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนรูปวัสดุ ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ตารางที่ 1 และรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการจำลองการเชื่อมบนชิ้นงาน จะพบว่าการคำนวณแบบแยกส่วนใช้เวลาน้อยกว่า กรณีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากัน ข้อจำกัดของการคำนวณแบบแยกส่วนคือการใช้วิธีนี้สามารถกระทำได้เฉพาะกรณีที่การเสียรูปเชิงกลไม่มีผลต่อพฤติกรรมอุณหภูมิ สำหรับกระบวนการเชื่อม พฤติกรรมเชิงกลส่งผลต่อพฤติกรรมอุณหภูมิค่อนข้างน้อย ความแตกต่างของอุณหภูมิส่วนนี้เกิดจากวัสดุใช้พลังงานจำนวนหนึ่งในการเปลี่ยนรูปพลาสติกจากความร้อน โดยเปลี่ยนเป็นพลังงานความเครียด (Strain Energy) การใช้พลังงานส่วนนี้จะทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งการใช้การคำนวณแบบแยกส่วนเชิงอุณหภูมิและเชิงกล พลังงานทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดความร้อนจะเปลี่ยนรูปไปเป็นอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ทำให้เกิดอุณหภูมิต่ำกว่าการคำนวณทั้งสองส่วนพร้อมกัน



รูปที่ 2 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิจากการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีคำนวณแบบแยกส่วนและคู่ควบ (ตำแหน่ง T1, T2 และ T3 แสดงในรูปที่ 9)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละแนวทาง

รูปแบบการคำนวณ	Uncoupled	Fully Coupled
จำนวนเอลิเมนต์	8064	
จำนวนโหนด	10795	
เวลาที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิ	01:32:19	13:21:48
เวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงกล	00:29:12	
เวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด	02:01:31	13:21:48

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

ในกระบวนการเชื่อมเกือบทุกวิธีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว การกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละจุดก็แตกต่างกันอย่างมาก ผลต่างของอุณหภูมินี้เป็นสาเหตุหลักในการเกิดการเสียรูปของชิ้นงานหลังการเชื่อม

กระบวนการถ่ายโอนความร้อนในงานเชื่อมสามารถแบ่งออกเป็น 4 โหมด คือ

1. การนำความร้อน (Conduction) คือการถ่ายเทพลังงาน

ความร้อนภายในเนื้อวัสดุ โดยความร้อนจะถ่ายเทจากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิมากกว่า ไปสู่มอเลกุลข้างเคียงที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ชิ้นงานไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่สภาวะแวดล้อม

2. การพาความร้อน (Convection) เป็นการสูญเสียพลังงานความร้อนจากบริเวณผิวของชิ้นงานออกสู่ของไหลหรืออากาศภายนอก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าการพาความร้อนและความเร็วในการไหลของของไหล

3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ การชนกันของอะตอมภายในวัสดุจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการเชื่อมแบบใต้ปลั๊กซ์จะเกิดการสูญเสียความร้อนในลักษณะนี้น้อย

4. การผลิตความร้อน (Heat Generation) การผลิตความร้อนในงานเชื่อมไฟฟ้า จะใช้การเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปกระแสไฟฟ้าเป็นความร้อนโดยการอาร์ก ระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม โดยการเชื่อมแต่ละแบบจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภาพแตกต่างกัน

2.2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการการทรงพลังงาน [4]

$$\int_{Vol} \rho \dot{U} dVol = \int_S q dS + \int_{Vol} g dVol \quad (1)$$

โดย Vol คือปริมาตรของวัตถุ

ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ

\dot{U} คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน

S คือพื้นที่ผิวของวัตถุ

q คือฟลักซ์ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่

g คือแหล่งความร้อนภายนอกต่อหน่วยปริมาตร

สมการการนำความร้อน [4]

$$f = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

โดย f คือฟลักซ์ความร้อน

k คือค่าการนำความร้อน

θ คืออุณหภูมิ

x คือตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก

สมการการพาความร้อน [4]

$$q = -h(\theta - \theta^0) \quad (3)$$

โดย h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

θ^0 คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

สมการการแผ่รังสีความร้อน [4]

$$q = A[(\theta - \theta^5)^4 - (\theta^0 - \theta^5)^4] \quad (4)$$

โดย A คือค่าคงที่การแผ่รังสีความร้อน

θ^5 คืออุณหภูมิต่ำสุดสัมบูรณ์

2.2.2 แหล่งกำเนิดความร้อน

ในการจำลองกระบวนการเชื่อม แหล่งกำเนิดความร้อนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่ง เพราะแหล่งกำเนิดความร้อนจะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายอุณหภูมิและขนาดของรอยเชื่อม เพราะฉะนั้นรูปร่างของแหล่งกำเนิดความร้อน ปริมาณความร้อน และความเข้มของพลังงานที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับตัวแปรงานเชื่อมที่ใช้จริง

การจำลองแหล่งกำเนิดความร้อนในอดีตเริ่มจากการใช้แหล่งกำเนิดความร้อนแบบจุดโดย Rosenthal [5] และการศึกษาเชิงทฤษฎีการแพร่ของความร้อนแบบ 1 มิติ และ 2 มิติโดย Rykalin [6] อย่างไรก็ตาม แบบจำลองให้ผลของอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางรอยเชื่อมสูงเกินอุณหภูมิของช่วงหลอมละลายไปอย่างมากซึ่งไม่เกิดขึ้นในความเป็นจริง

Friedman [3] ได้นำเสนอแหล่งกำเนิดความร้อนโดยใช้การกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian Distributed Heat Source) บนผิวของวัตถุเพื่อจำลองการเกิดฟลักซ์ความร้อนแบบจุด โดยมีสมการดังนี้

$$q(r) = q_{max} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) = \frac{3Q}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (5)$$

โดย q คือฟลักซ์ความร้อน

q_{max} คือฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดความร้อน

r คือระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางของบริเวณที่เกิดความร้อนถึงจุดใดๆ

R คือรัศมีของบริเวณที่เกิดความร้อน

ต่อมา Goldak [7] ได้นำเสนอแหล่งกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric Heat Source) แบบรูปทรงรีตันคูล์ โดยมีการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian Distribution-based Double-ellipsoid Moving Heat Source) ซึ่งให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าแบบที่กล่าวมา นอกจากนั้นยังมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนอีกด้วย โดยสมการของแหล่งกำเนิดความร้อนที่ Goldak นำเสนอคือ

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c^2} \quad (6)$$

โดย x, y, z คือตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก

a, b, c คือขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนในระบบพิกัดฉาก

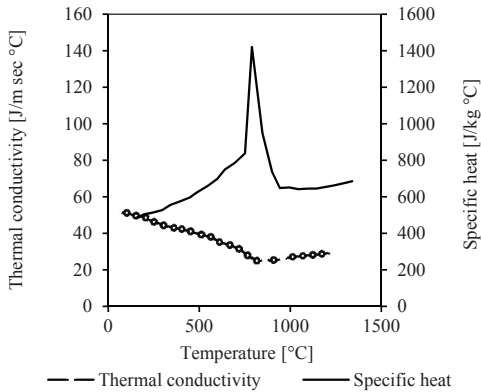
Q คือพลังงานความร้อนของการอาร์ก

แหล่งกำเนิดความร้อนของ Goldak สามารถจำลองการเชื่อมได้ดีกว่าของ Friedman เพราะเป็นการให้ความร้อนภายในเนื้อวัสดุซึ่งกรณีของ Friedman เป็นการให้ความร้อนที่ผิววัสดุเท่านั้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Goldak ยังมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถจำลองรอยเชื่อมกรณีมีการเชื่อมลึกมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

DuPont และคณะ [8] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการเชื่อมอาร์ก 4 ประเภท ได้แก่ การเชื่อมอาร์กพลาสมา (PAW) การเชื่อมอาร์กทังสเตน (GTAW) การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซปกคลุม (GMAW) และการเชื่อมแบบตัดฟลักซ์ (SAW) พบว่าการเชื่อมแบบตัดฟลักซ์มีการสูญเสียพลังงานในระหว่างเชื่อมน้อยที่สุด โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิเท่ากับ 0.85

2.2.3 สมบัติเชิงอุณหภาพของวัสดุ

เหล็กกล้าโครงสร้างคาร์บอนต่ำ เกรด ASTM A36



รูปที่ 3 ค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิ [7]

มีความหนาแน่นเท่ากับ 7860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความร้อนแฝงในการหลอมละลายของวัสดุเท่ากับ 2.672×10^5 จูลต่อกิโลกรัม และใช้ค่าการนำความร้อน 120 มิลลิจูลต่อมิลลิเมตรวินาที องศาเซลเซียสในสถานะหลอมเหลว เพื่อจำลองการพาความร้อนเนื่องจากการหมุนวนของโลหะเหลวในบ่อหลอม

อย่างไรก็ตาม สมบัติวัสดุเชิงอุณหภูมิสามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยรูปที่ 3 แสดงค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิ

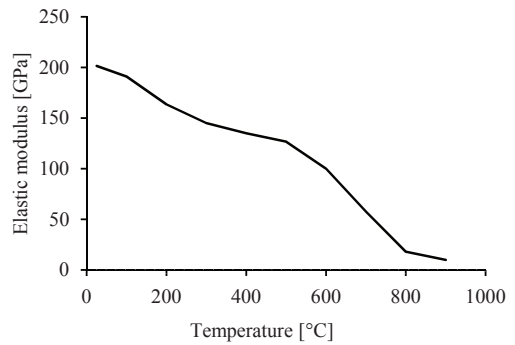
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์เชิงกล

2.3.1 การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก

การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) เป็นการเสียรูปของวัสดุในช่วงแรกหรือช่วงที่เกิดความเค้นน้อยกว่าความเค้นคราก (Yield Stress) วัสดุจะยังสามารถกลับคืนรูปร่างเดิมได้หลังปลดภาระ

สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของความเค้นและความเครียดในช่วงอีลาสติก โดยคำนึงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ คือ

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right\} - \frac{E\alpha\Delta T}{1-2\nu} \delta_{ij} \quad (7)$$



รูปที่ 4 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเหล็กกล้ากับอุณหภูมิ [11]

- โดย α คือค่าการขยายตัวอุณหภูมิ
- ν คืออัตราส่วนปัวซอง
- E คือโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
- ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ
- δ_{ij} คือเดลตาโครเนกเกอ์
- ε_{ij} คือเทนเซอร์ความเครียด
- σ_{ij} คือเทนเซอร์ความเค้น

2.3.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก

การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) คือ เมื่อวัสดุเกิดความเค้นจนเกินจุดครากตัว (Yield Point) วัสดุจะสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งและเกิดการเสียรูปอย่างถาวร วัสดุจะเกิดการเพิ่มความแข็ง (Hardening) ทำให้มีความแข็งมากขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง [9], [10]

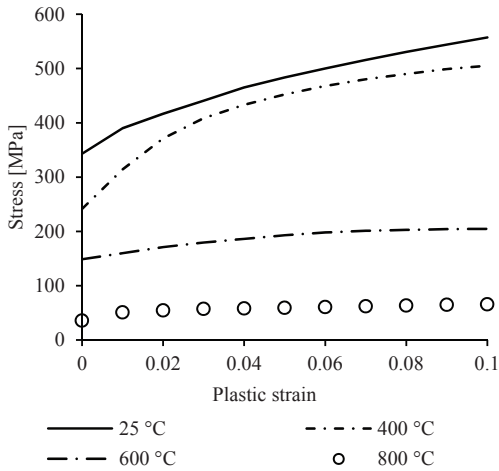
2.3.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเหล็กกล้าโครงสร้างเกรด ASTM A36 จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4 และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กกล้าโครงสร้างกับอุณหภูมิดังรูปที่ 5

3. วิธีการทดลอง

3.1 การวัดและบันทึกอุณหภูมิขณะเชื่อมชิ้นงานโลหะแผ่นด้วยเทอร์โมคัปเปิล

3.1.1 ขั้นตอนการทดลองและพารามิเตอร์งานเชื่อม การทดลองเชื่อมชิ้นงานกระทำตามมาตรฐานและ



รูปที่ 5 ค่าความเค้นครากต่อความเครียดช่วงพลาสติกกับอุณหภูมิ [11]

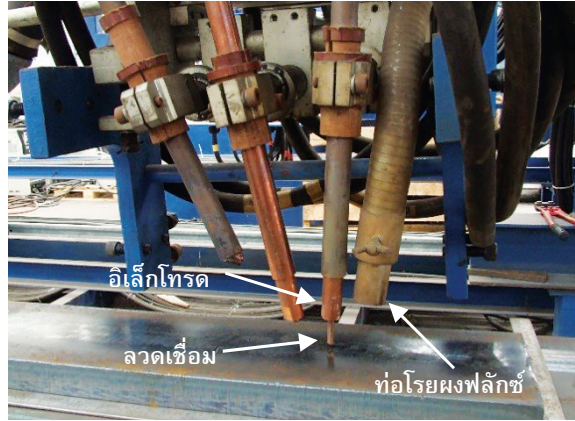
ใช้พารามิเตอร์ที่แนะนำโดย IWE [12] ด้วยเครื่องเชื่อมใต้ฟลักซ์แบบอัตโนมัติรุ่น Lincoln-Gantry ดังรูปที่ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมคือ 4.0 มิลลิเมตร ขนาดของชิ้นงานเท่ากับ 300 × 500 × 9 มิลลิเมตร

พารามิเตอร์งานเชื่อมที่เลือกใช้คือ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive: DCEP) ความต่างศักย์ (V) คือ 35 โวลต์ และค่ากระแส (I) ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 475 และ 520 แอมแปร์ ความเร็วในการเดินอิเล็กโทรด (T^{-1}) เท่ากับ 73 และ 80 เซนติเมตรต่ออนาที ดังแสดงในตารางที่ 2

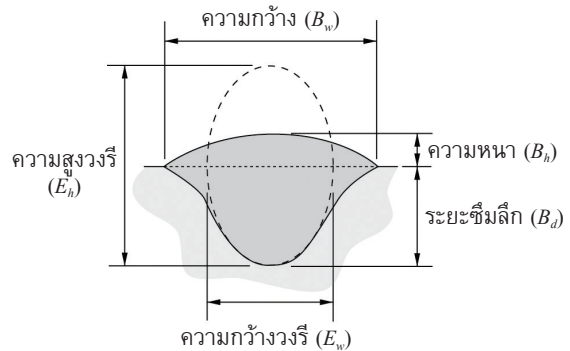
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์งานเชื่อมที่เลือกใช้ [12]

กรณี	1	2
ประเภทงานเชื่อมไฟฟ้า	DCEP	
ค่าความต่างศักย์ [V]	35	
ค่ากระแส [A]	475	520
ความเร็วการเดินแนวเชื่อม [cm/min]	73	80

ภาคตัดรอยเชื่อมถูกวัดขนาดโดยวิธี Macro Photography โดยขนาดของรอยเชื่อมประกอบด้วย ความกว้างของรอยเชื่อม (B_w), ความหนารอยเชื่อม (B_h),



รูปที่ 6 เครื่องเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่ 7 ภาพตัดขวางแสดงขนาดของรอยเชื่อม

ความยาวของรอยเชื่อม (B_l), ความกว้างวงรี (E_w) และ ความสูงวงรี (E_h) ดังแสดงในรูปที่ 7

เครื่องเก็บบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) Lutron BTM-4208SD วัดอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที (Sampling rate = 1 Hertz) ด้วยเทอร์โมคัปเปิลประเภทเค (K-type Thermocouple) ทั้งหมด 3 ตัว ดังรูปที่ 8 ติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงาน โดยห่างจากแนวเชื่อม 12, 18 และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 9 เนื่องจากรอยเชื่อมมีขนาดเล็ก และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงมาก ทำให้ไม่สามารถติดตั้งบนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ได้ จึงจำเป็นต้องติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลห่างออกมาเพื่อป้องกันไม่ให้เครื่องมือวัดเกิดความเสียหาย

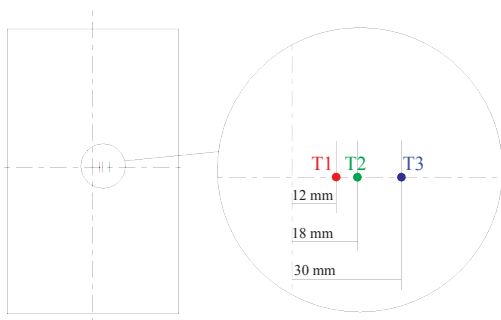


(ก)



(ข)

รูปที่ 8 อุปกรณ์ทดลองและเครื่องมือวัดการกระจายอุณหภูมิ (ก) เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (ข) เทอร์โมคัปเปิลประเภทเค



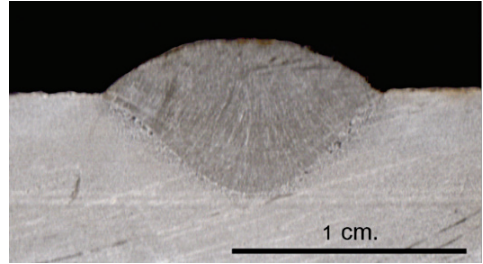
รูปที่ 9 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนผิวของชิ้นงาน

3.1.2 ผลการทดสอบรอยเชื่อมโดยวิธี Macro Photography

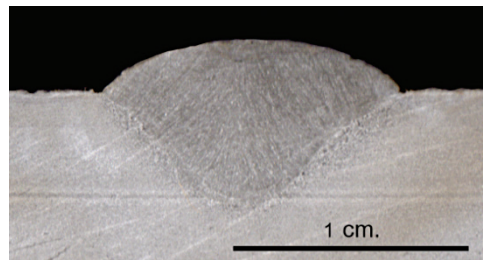
ภาคตัดรอยเชื่อมในกรณีที่ 1 และ 2 แสดงในรูปที่ 10 ทั้งสองกรณีให้ผลลัพธ์ขนาดของรอยเชื่อมใกล้เคียงกัน แต่รอยเชื่อมกรณีที่ 2 มีการซึมลึกและความยาวมากกว่า โดยขนาดของรอยเชื่อมที่วัดได้ถูกสรุปในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลขนาดรอยเชื่อมจากการทดลองเชื่อมโลหะแผ่นบาง

กรณี	B_w	B_h	B_l	E_w	E_h
1	11.94	2.37	47	7.20	6.92
2	12.68	2.22	57	7.10	9.58



(ก)

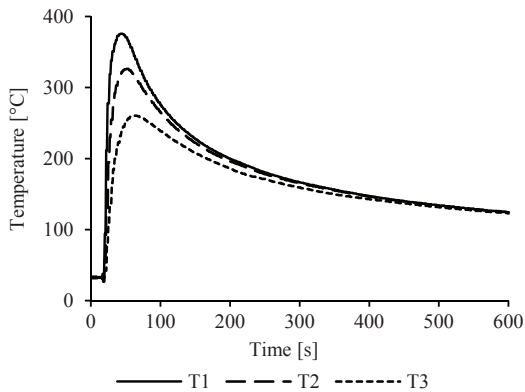


(ข)

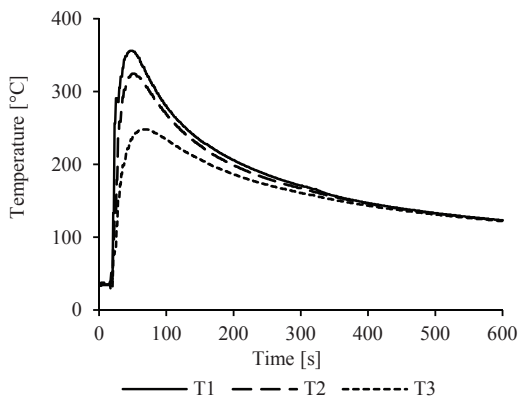
รูปที่ 10 ภาพมาโครกราฟี่แสดงขนาดรอยเชื่อมจากการทดลองเชื่อมแผ่นเหล็กหนา 9 มม. (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2

3.1.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองของกรณีที่ 1 และ 2 ถูกนำเสนอในรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ตามลำดับ ที่ระยะห่างจากเส้นผ่านศูนย์กลางแนวเชื่อม 12 มิลลิเมตร สำหรับกรณีที่ 1 เทอร์โมคัปเปิล T1 วัดค่าอุณหภูมิสูงสุด (Peak Temperature) ได้เท่ากับ 375.8°C สำหรับกรณีที่ 2 เทอร์โมคัปเปิล T1 วัดอุณหภูมิสูงสุดได้เท่ากับ 355.8°C ซึ่งอุณหภูมิแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะปริมาณความร้อนในการเชื่อมมีค่าเทียบเคียงกัน หรือค่าพารามิเตอร์งานเชื่อมที่ใช้ใกล้เคียงกันมาก สำหรับทั้งสองกรณี พบว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งใกล้แนวเชื่อมบันทึกค่าอุณหภูมิได้สูงกว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งห่างออกไป คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งใดๆ บนชิ้นงาน สำหรับกรณีงานเชื่อมอาร์กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะเสมอ กล่าวคือ ช่วงการให้ความร้อน (Heating Stage) จนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งนั้น กับช่วงการเย็นตัว (Cooling Stage) ของชิ้นงาน ซึ่งอัตราการเย็นตัวจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาตามแนวรอยเชื่อมกรณีที่ 1



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาตามแนวรอยเชื่อมกรณีที่ 2

สุดท้ายที่เกิดขึ้นในบริเวณ HAZ ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องงานเชื่อมและความแข็งแรงของแนวเชื่อม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลทั้งสามตัวของทั้งสองกรณี สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าที่ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลเดียวกัน อุณหภูมิสูงสุดของกรณีที่ 1 จะมากกว่ากรณีที่ 2 เล็กน้อย แต่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating Rate) มีค่าใกล้เคียงกันมาก

3.2 การวัดระยะการโค้งตัวของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม

3.2.1 วิธีการวัดระยะโค้งตัวในแนวตั้งและเชิงมุม

ในการวัดขนาดการโค้งตัวในแนวตั้งจะใช้เครื่องมือวัด 3 มิติ รุ่น Brown&Sharpe MicroVal Pfx โดยเครื่องจะใช้หัวบอลและที่ผิวบนของชิ้นงาน แล้วให้ค่าตำแหน่งของจุดบนผิวขณะที่แต่ละออกมาในระบบพิกัดฉาก ความละเอียดในการวัดสูงสุดของเครื่อง 0.001 มิลลิเมตร หรือ 1 ไมครอน ใช้แกนและจุดอ้างอิงปกติของเครื่อง ชิ้นงานติดตั้งวางบนโต๊ะระดับ

การวัดการเสีयरูปของชิ้นงานจะกระทำทุกๆ ระยะ 100 มิลลิเมตรตามแนวเชื่อม เนื่องจากกึ่งกลางของชิ้นงานเป็นแนวรอยเชื่อม จึงเริ่มต้นการวัดห่างจากแนวเชื่อม 20, 40, 70, 110 และ 150 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14

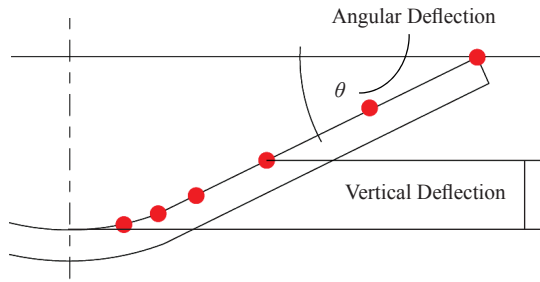
3.2.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ภายหลังการวัดระยะโค้งตัวถาวรแล้ว จะนำค่าทั้งสองด้านของชิ้นงานมาหาค่าเฉลี่ย ดังสมการ

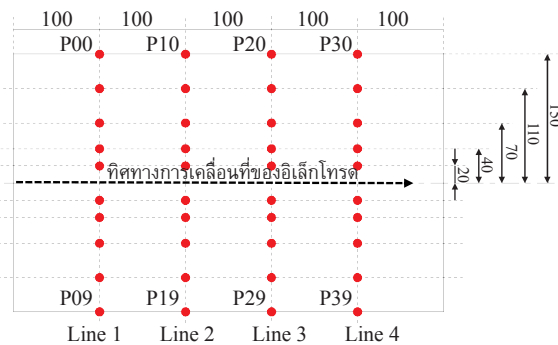
$$\Delta_{average} = \frac{\Delta P_{ij} + \Delta P_{i,(9-j)}}{2} \quad (8)$$

ตารางที่ 4 ผลบันทึกอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสำหรับกรณีที่ 1 และ 2

กรณี	เทอร์โมคัปเปิล	อุณหภูมิเริ่มต้น [°C]	อุณหภูมิสูงสุด [°C]	เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิ [s]	อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ [°C/s]
1	T1	31.6	375.8	26	14.45
	T2	32.8	326.2	31	10.52
	T3	32.8	260.4	37	7.04
2	T1	35.4	355.8	28	12.71
	T2	35.5	324.5	30	10.816
	T3	35.6	247.9	40	6.20



รูปที่ 13 ภาคตัดแสดงตำแหน่งการวัดระยะโก่งตัวของชิ้นงานในแนวตั้งและเชิงมุม



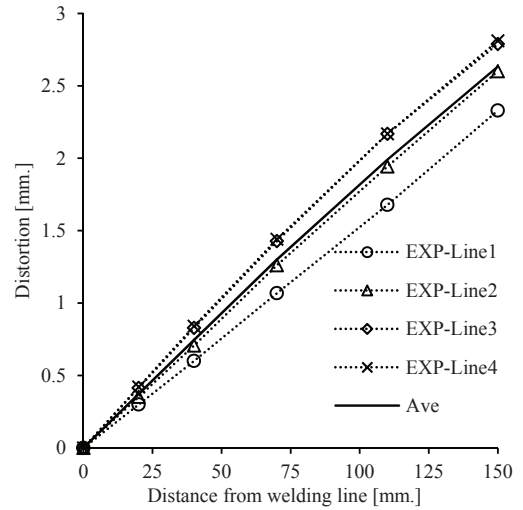
รูปที่ 14 ตำแหน่งบนระนาบเพื่อวัดระยะโก่งตัวถาวรของชิ้นงานเหล็กแผ่น (หน่วยมิลลิเมตร)

โดย $0 \leq i \leq 4, 0 \leq j \leq 4$

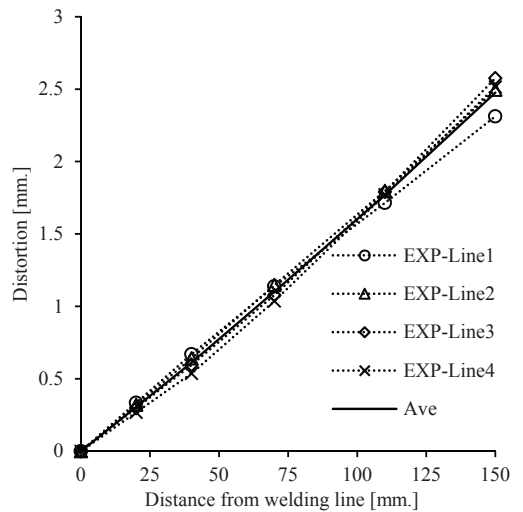
Δ คือระยะการโก่งตัวแนวตั้ง

ลักษณะการโก่งของแผ่นชิ้นงาน พบว่าทั้งสองกรณีชิ้นงานมีระยะโก่งตัวใกล้เคียงกันมาก คือเกิดการดัดตัวเฉพาะบริเวณใกล้กับรอยแนวเชื่อม ทำมุมอยู่ในช่วง 0.76 ถึง 0.91 องศา กับแนวระดับ เมื่อเปรียบเทียบการโก่งตัวในแต่ละภาคตัด พบว่าภาคตัดที่อยู่ใกล้กับจุดเริ่มต้นการเชื่อมจะมีการโก่งตัวน้อยกว่าจุดที่อยู่ใกล้จุดสิ้นสุดการเชื่อมประมาณร้อยละ 10 ถึง 15

โดยการเสียรูปเชิงมุมถูกนำเสนอในตารางที่ 5 ระยะโก่งตัวถาวรในแนวตั้งที่วัดได้บนเส้นตรง Line1, Line2, Line3 และ Line4 หรือภาคตัดทั้ง 4 ดังแสดงในรูป 4 ถูกนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระยะโก่งตัวถาวรกับระยะห่างจากแนวเชื่อมในรูปที่ 15 และรูปที่ 16



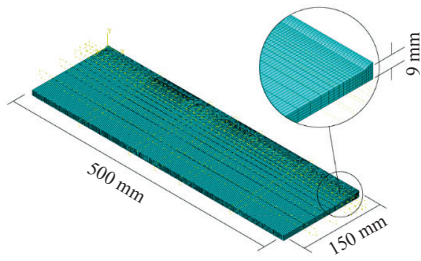
รูปที่ 15 การโก่งตัวถาวรของชิ้นงานตามแนวขวางกับรอยเชื่อมในกรณีที่ 1



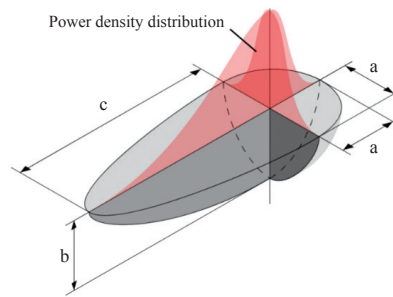
รูปที่ 16 การโก่งตัวถาวรของชิ้นงานตามแนวขวางกับรอยเชื่อมในกรณีที่ 2

ตารางที่ 5 ขนาดการโก่งตัวเชิงมุม (องศา)

	Line1	Line2	Line3	Line4	ค่าเฉลี่ย
กรณีที่ 1	0.930°	1.030°	1.088°	1.096°	1.036°
กรณีที่ 2	0.906°	0.997°	1.044°	0.994°	0.973°



รูปที่ 17 ขนาดของชิ้นงานและการแบ่งเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิและการโค้งตัว



รูปที่ 18 รูปทรงสามมิติของแหล่งกำเนิดความร้อน [13]

4. แบบจำลองเชิงตัวเลข

4.1 การจำลองและกำหนดพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดความร้อน

4.1.1 ขนาดชิ้นงานและการแบ่งเอลิเมนต์

แบบจำลองชิ้นงานและแนวเชื่อมถูกสร้างขึ้นในลักษณะสมมาตรแบบครึ่งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 17 ใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และประยุกต์ใช้เอลิเมนต์ในกลุ่มการถ่ายเทความร้อนและมีการประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Heat Transfer - Hexahedral - Linear Geometric Order: DC3D8) โดยแบ่งเอลิเมนต์ละเอียดยบริเวณแนวเชื่อมซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่เกิดความแตกต่างอุณหภูมิสูง (High Temperature Gradient) และใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ห่างแนวเชื่อมออกไป ในแบบจำลองนี้ใช้จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 32,500 เอลิเมนต์ ซึ่งมีจำนวนโหนดเท่ากับ 40,662 โหนด

4.1.2 เงื่อนไขขอบเขตและแหล่งกำเนิดความร้อน

กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส โดยไม่คำนึงถึงการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน พลังงานความร้อนของแหล่งกำเนิดความร้อนทั้งหมดเปลี่ยนรูปมาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม โดยพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมด คือ

$$Q = VI \cdot \xi \quad (9)$$

โดย ξ คือประสิทธิภาพอุณหภาพของการเชื่อม (Thermal Efficiency) เท่ากับ 0.85 [8]

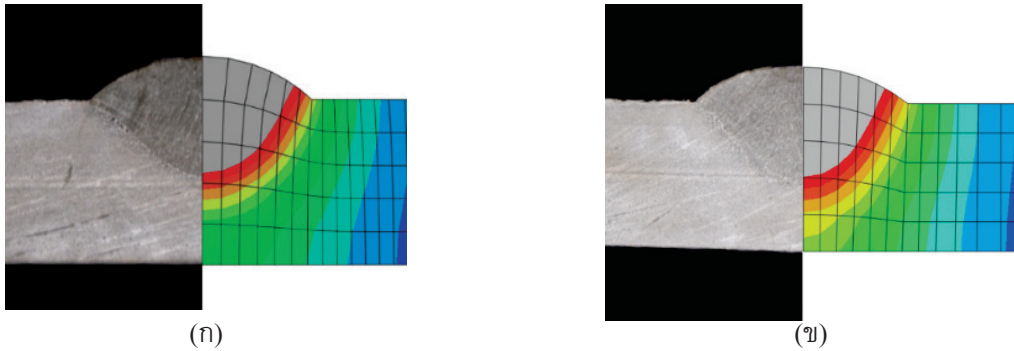
การกระจายตัวของความร้อนแบบรูปทรงรีตันซ้อนทับกันโดยการแจกแจงแบบเกาส์เซียนถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรกระทำกับชิ้นงาน จากการตัดแปลงสมการที่ (6) ปริมาณความหนาแน่นของความร้อนที่จุดใดๆ ในแกน x, y, z คือ

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_{fr}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3(z+vt)^2/c^2} \quad (10)$$

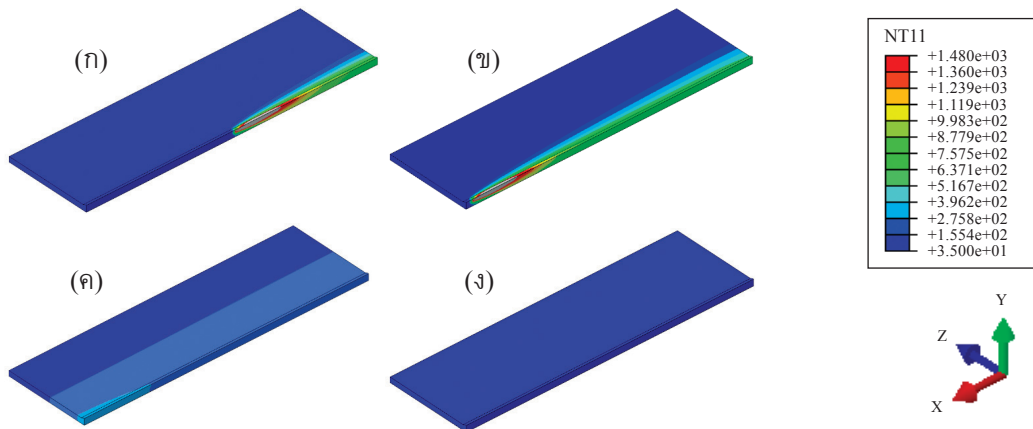
โดย Q คือพลังงานความร้อนทั้งหมด f_{fr} คือตัวประกอบของการกระจายตัวด้านหน้าและด้านหลัง v คือความเร็วในการเชื่อม t คือเวลา และ a, b, c เป็นแกนของรูปทรงรีในทิศทาง x, y, z ดังแสดงในรูปที่ 18

ตัวแปรของแหล่งกำเนิดความร้อนประกอบด้วย a, b, c ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของบ่อหลอมที่ได้จากการทดลอง โดยการคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดรอยเชื่อม (Size Fraction) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กำหนดขนาดโดยรวมของแหล่งกำเนิดความร้อนว่าจะมีขนาดเป็นกี่เท่าของขนาดรอยเชื่อม โดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อม ขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ของขนาด ได้กระทำวิจัยเชิงลึกแล้ว [13] พบว่า

$$\begin{aligned} a &= SF \cdot \frac{E_w}{2} \\ b &= SF \cdot \frac{E_h}{2} \\ c &= SF \cdot \frac{B_f}{2} \end{aligned} \quad (11)$$



รูปที่ 19 เปรียบเทียบขนาดของรอยเชื่อม ($T_f=1480^{\circ}\text{C}$) จากการคำนวณและทดลอง (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2



รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาของชิ้นงานเชื่อม (ก) วินาทีที่ 20 (ข) วินาทีที่ 40 (ค) วินาทีที่ 200 (ง) เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับ 35°C

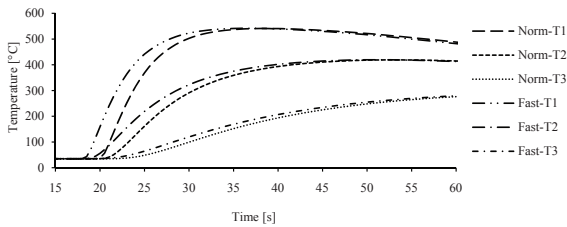
โดย SF คือค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดรอยเชื่อม
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณตามระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำเสนอในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแหล่ง
กำเนิดความร้อนทรงรีตันซ้อนทับกัน

พารามิเตอร์	การจำลอง กรณีที่ 1	การจำลอง กรณีที่ 2
a	5.04	4.97
b	4.84	6.70
c	65.17	79.8
V	35	35
I	475	520
T	73	80
ζ	0.85	0.85

4.1.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ผล
รูปร่างของรอยเชื่อมจากการคำนวณโดยใช้แบบ
จำลองมีขนาดเท่ากับผลการทดลองดังรูปที่ 19 ซึ่งสามารถ
สรุปได้ว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไป
ประยุกต์ใช้งานได้ ในอุตสาหกรรม

พฤติกรรมการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นงานแสดงในรูป
ที่ 20 โดยชิ้นงานจะมีการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว
เมื่อแหล่งกำเนิดความร้อนเดินทางมาถึง และจะเย็นตัวลง
ภายหลังแหล่งกำเนิดความร้อนเคลื่อนที่ผ่านไป เมื่อ
เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลทั้งสามตัว
พบว่าทั้งสองกรณีมีคุณลักษณะอุณหภูมิในห้วงเวลา
การให้ความร้อนใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 21 โดยอุณหภูมิ



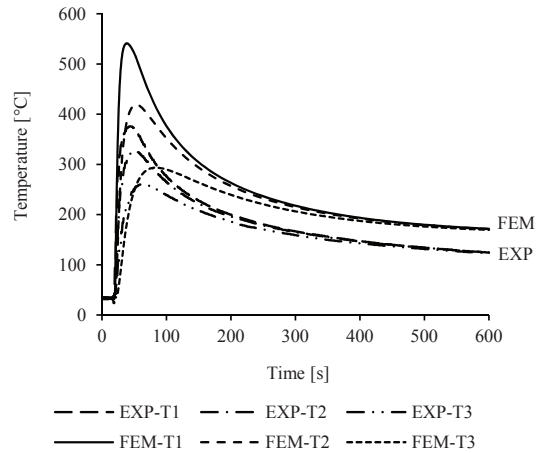
รูปที่ 21 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาขณะให้ความร้อนสำหรับกรณีที่ 1 และ 2

สูงสุด ณ ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล T1, T2 และ T3 จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 541, 419 และ 294 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพบว่าที่ตำแหน่งห่างจากแนวรอยเชื่อม นอกจากจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าแล้ว เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึงค่าสูงสุดก็ช้ากว่าด้วย ส่งผลให้อัตราการเพิ่มของความร้อนช้า โดยสังเกตจากค่าความชันของกราฟอุณหภูมิของตำแหน่ง T1, T2 และ T3

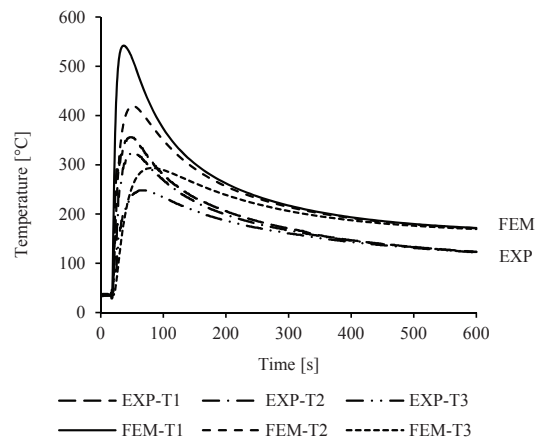
รูปที่ 22 และ 23 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับอุณหภูมิต่อเวลา ซึ่งพบว่ากราฟอุณหภูมิกับเวลาที่มีลักษณะพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ ช่วงการให้ความร้อน ค่าความชันของอุณหภูมิต่อเวลาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่ออิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งนั้นไปแล้ว ชีงงานจะเย็นตัวทำให้อุณหภูมิลดลง และความชันของอุณหภูมิต่อเวลามีค่าเป็นลบ

โดยภาพรวมแล้ว พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลทั้งสามตำแหน่งเสมอ หากพิจารณาที่เวลา 600 วินาที ค่าความแตกต่างอุณหภูมินี้ เท่ากับ 46 องศาเซลเซียส ซึ่งแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิเป็นไปในลักษณะที่สอดคล้องกัน

จากผลการคำนวณ พบสาระสำคัญ คือเมื่อควบคุมพลังงานความร้อนโดยรวมให้มีค่าเท่ากัน (Total Heat Input) และหากอัตราพลังงานความร้อนต่อเวลา (Heating Rate) แตกต่างกันไปไม่มาก จะส่งผลต่อพฤติกรรมอุณหภูมิที่คำนวณได้เพียงเล็กน้อย ผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าทั้งสองกรณีนี้มีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

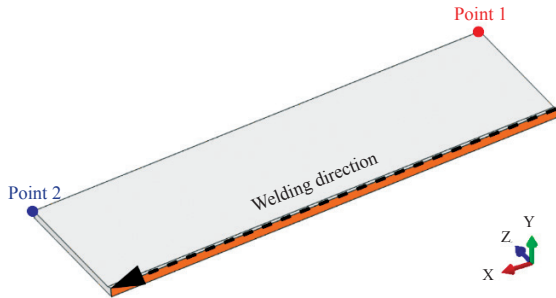


รูปที่ 22 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาที่ได้ออกจากการคำนวณและการทดลอง กรณีที่ 1

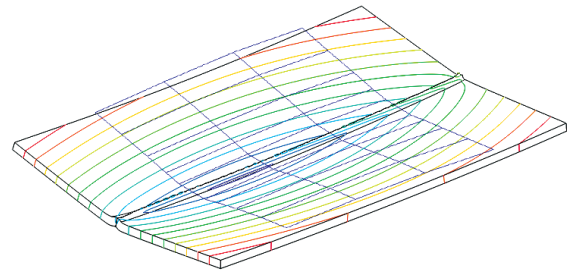


รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาที่ได้ออกจากการคำนวณและการทดลอง กรณีที่ 2

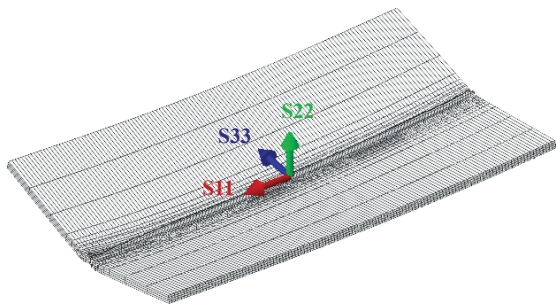
ใกล้เคียงกันมาก ทั้งปริมาณการเกิดความร้อน อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ อัตราการเย็นตัว รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นการเพิ่มความเร็วในการเดินแนวเชื่อมหรือความเร็วหัวอิเล็กทรอนิกส์จาก 73 เป็น 80 เซนติเมตรต่อนาที พร้อมกับปรับเพิ่มค่ากระแสเชื่อมจาก 475 เป็น 520 แอมป์ เพื่อชดเชยให้พลังงานรวมที่ใช้เท่าเดิม การปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของอุณหภูมิ



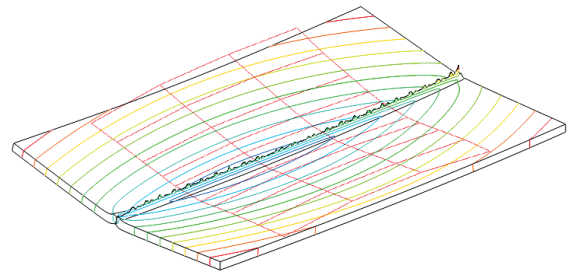
รูปที่ 24 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเพื่อวิเคราะห์การโก่งตัวถาวร



รูปที่ 26 เปรียบเทียบการโก่งตัวถาวรจากการคำนวณและการทดลอง กรณีที่ 1



รูปที่ 25 การโก่งตัวถาวรและทิศทางการเค้นดัดค้าง



รูปที่ 27 เปรียบเทียบการโก่งตัวถาวรจากการคำนวณและการทดลอง กรณีที่ 2

4.2 การจำลองการโก่งตัวถาวรของชิ้นงานเชื่อมภายใต้อิทธิพลของความร้อน

4.2.1 รูปร่างวัสดุและการแบ่งเอลิเมนต์

รูปร่างของวัสดุและการแบ่งเอลิเมนต์จะใช้แบบเดียวกันกับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ แต่ประเภทของเอลิเมนต์จะเป็นแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์กลุ่มความเค้นสามมิติ การประมาณค่าแบบเชิงเส้น (3D Stress - Hexahedral - Linear Geometric Order: C3D8)

4.2.2 เงื่อนไขขอบเขต

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่มีการใช้เครื่องมือจับยึด (Clamping Device) ชิ้นงานเข้ากับแท่นเครื่องเชื่อม การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานมีความสมมาตรและขจัดผลกระทบจากความเค้นภายในอันเกิดจากการจับยึดชิ้นงาน ดังนั้นแบบจำลองชิ้นงานจึงสามารถโก่งตัว ขยายตัว หดตัว ตัดตัว หรือโค้งงอได้อย่างอิสระ โดยกำหนดให้ด้านรอยเชื่อมมีสมมาตรกับ

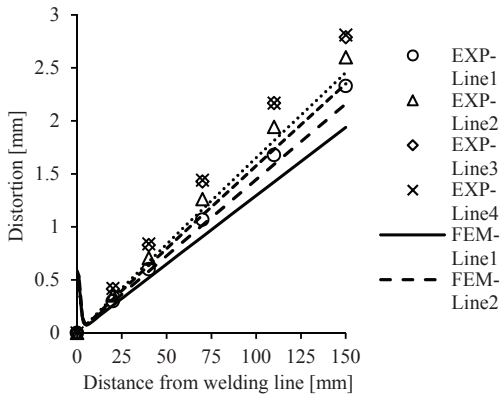
ระนาบ XY ($U_3 = 0$) จุดที่ 1 ไม่เคลื่อนที่ในแกน X และ Y ($U_1 = U_2 = 0$) และจุดที่ 2 ไม่เคลื่อนที่ในแกน Y ($U_2 = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 24

ชิ้นงานไม่มีการรับภาระเชิงกลใดๆ แต่จะใช้ข้อมูลการเกิดอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาที่เป็นผลการคำนวณเชิงอุณหภูมิ (Thermal Analysis) มากำหนดอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงาน ซึ่งคือภาระอุณหภูมิ สำหรับการคำนวณเชิงกล (Thermo-mechanical Module) ลำดับถัดมา

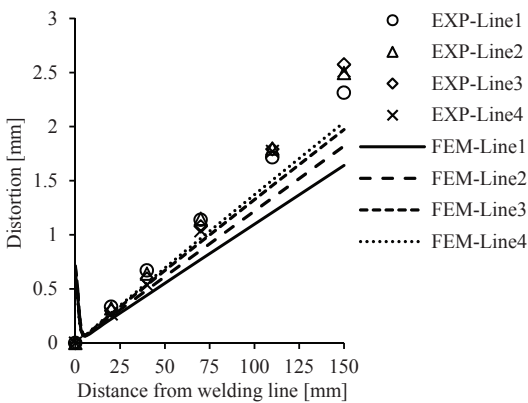
ทิศทางการพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานแสดงในรูปที่ 25

4.2.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ผล

จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานจะมีลักษณะการโก่งตัวคล้ายคลื่นกันตลอดชิ้นงานทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 26 และรูปที่ 27 โดยด้านที่อยู่ใกล้กับจุดเริ่มต้นการเชื่อมจะเกิดการโก่งตัวน้อยกว่าบริเวณอื่น



รูปที่ 28 การเปรียบเทียบระยะโก่งตัวถาวรกรณีที่ 1

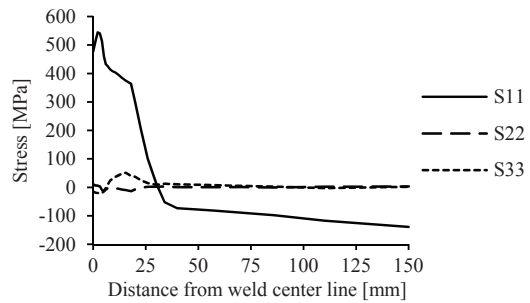


รูปที่ 29 การเปรียบเทียบระยะโก่งตัวถาวรกรณีที่ 2

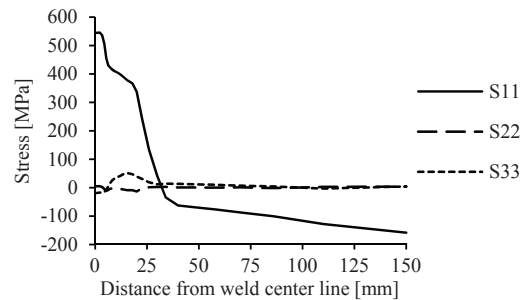
เมื่อเปรียบเทียบขนาดการเสียรูปจากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับ 2 กรณีพบว่า การใช้พารามิเตอร์งานเชื่อมในกรณีที่ 1 มีขนาดการโก่งตัวในแนวตั้งมากกว่าการใช้พารามิเตอร์งานเชื่อมในกรณีที่ 2 ประมาณร้อยละ 17.7 ถึง ร้อยละ 20.7 ในแต่ละภาคตัดของชิ้นงาน

หากเปรียบเทียบการโก่งตัวที่ได้จากการทดลองวัดระยะกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 28 และ 29 พบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการจำลองการโก่งตัวแนวตั้งในกรณีที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ากรณีที่ 2 เท่ากับ ค่าเฉลี่ยร้อยละ 17.79 ในขณะที่กรณีที่ 2 มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 19.59

การเกิดความเค้นจะเกิดขณะที่วัสดุเริ่มเย็นตัวหลัง



รูปที่ 30 ผลการคำนวณความเค้นตกค้างที่ผิวด้านบนของชิ้นงาน กรณีที่ 1



รูปที่ 31 ผลการคำนวณความเค้นตกค้างที่ผิวด้านบนของชิ้นงาน กรณีที่ 2

จากที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ผ่านไปแล้ว โดยบริเวณด้านข้างใกล้รอยเชื่อมซึ่งเกิดความร้อนสูงแต่ไม่เพียงพอที่จะหลอมละลาย (HAZ) จะเกิดความเค้นตกค้างขึ้นก่อน จากนั้นเมื่อบ่อหลอมเริ่มแข็งตัวจะถูกดึงจากบริเวณรอบๆ ทำให้เกิดความเค้นสูงสุดที่บริเวณรอยเชื่อม

ทิศทางของความเค้นในรูปที่ 25 แสดงค่าความเค้นตลอดแนวภาคตัดขวางกึ่งกลางชิ้นงาน ได้แก่ ความเค้นแรงดึงตามแนวเชื่อม (Longitudinal Stress: S11) เกิดขึ้นบนรอยเชื่อม มีค่าประมาณ 540-545 MPa รองลงมาคือความเค้นตามแนวขวางกับรอยเชื่อม (Transverse Stress: S33) เกิดห่างออกมาจากรอยเชื่อมเล็กน้อย มีค่าความเค้นสูงสุดประมาณ 40-47 MPa ส่วนความเค้นตามความหนาของชิ้นงาน (Transverse Through-Thickness Stress: S22) มีค่าน้อย เนื่องจากชิ้นงานบาง ดังแสดงในรูปที่ 30 และรูปที่ 31 สำหรับกรณีที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สภาวะความเค้น

ของภาคตัดขวางรอยเชื่อมที่สำคัญ คือความเค้นแรงดึง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งหรือบิดตัว

Teng และคณะ [14] ได้รายงานพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นตักในลักษณะเดียวกันกับผลการคำนวณในงานวิจัยนี้เช่นกัน โดยความเค้นที่มีค่ามากที่สุด คือความเค้นแรงดึงตามแนวเชื่อม (S11) และมีการให้ข้อมูลเพิ่มเติมอีกว่า การจับยึดชิ้นงานมีผลส่งเสริมให้ความเค้นตักในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

5. สรุป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้ในการประเมินการกระจายอุณหภูมิและขนาดของการโก่งตัวถาวรในชิ้นงานเชื่อมได้จริง เวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่มากนัก มีความถูกต้องแม่นยำ และมีวิธีการดำเนินงานเป็นระเบียบขั้นตอน สามารถเข้าใจได้และไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองงานเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ภายใต้เงื่อนไขพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้ ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ลดการโก่งตัวของโครงสร้างสำเร็จขนาดใหญ่ (Final Structural Integrity) ซึ่งสามารถกระทำโดยการปรับเลือกพารามิเตอร์งานเชื่อม (Optimal Welding Parameters) ควบคู่กับการจัดลำดับขั้นตอนในการเชื่อมประกอบ (Welding Sequence) ให้เหมาะสมถูกต้อง หรือแม้แต่ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีวิจัยนี้ เพื่อการศึกษาจำลองงานเชื่อมรูปแบบอื่น ๆ ได้ ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ

- แบบจำลองแหล่งกำเนิดความร้อนของโกลด์กถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ ซึ่งจัดเป็นแบบจำลองแหล่งกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรสามมิติที่เหมาะสมกับการเชื่อมประเภทนี้ การหารูปร่างและความเข้มของพลังงานของแหล่งกำเนิดความร้อนต้องกระทำควบคู่กับการทดลอง จากการบูรณาการกระบวนการยืนยันความถูกต้อง (Validity) ของแบบจำลองนี้ เช่น การเปรียบเทียบขนาดรูปร่างรอยเชื่อม การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา การเปรียบเทียบระยะโก่งตัวของชิ้นงาน

ทำให้เชื่อมั่นได้ว่า แบบจำลองเชิงตัวเลขนี้เป็นประโยชน์ต่อการปรับค่าพารามิเตอร์งานเชื่อมใต้ฟลักซ์ซึ่งจะช่วยลดหรือบรรเทาการโก่งตัวและความเค้นตักในชิ้นงานได้

- ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบแยกโมดูลและแบบคู่ควบของโมดูลเชิงคุณภาพและเชิงกลส่งผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิต่อเวลาที่คำนวณได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งการคำนวณแบบแยกโมดูลใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าและสามารถเก็บข้อมูลการกระจายอุณหภูมิต่อเวลาสำหรับพารามิเตอร์งานเชื่อมแต่ละแบบไว้ใช้ในภายหลังได้ กรณีมีการปรับหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติวัสดุเชิงกล ขนาดของเอลิเมนต์ หรือเงื่อนไขขอบเขตของชิ้นงาน ซึ่งไม่ต้องมีการคำนวณการกระจายอุณหภูมิใหม่ ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายการคำนวณได้อย่างมาก แต่การคำนวณแบบนี้จะไม่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากการโก่งตัวถาวรของวัสดุส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิ [15]

- สำหรับผลสรุปการเปรียบเทียบการโก่งตัวถาวรของชิ้นงานสำเร็จ พบว่าขนาดระยะการโก่งตัวที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยในกรณีที่ 1 และ 2 มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 17.79 และ 19.59 ตามลำดับ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนนี้มีแนวโน้มลดลง เมื่อเดินหัวเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยความเร็วที่ช้าลง อย่างไรก็ตาม ผลการโก่งตัวที่คำนวณได้มีลักษณะรูปร่างและแนวโน้มสอดคล้องกับการเสียรูปของชิ้นงานจริงทุกประการ ซึ่งการเตรียมชิ้นงานนี้เกิดจากการปฏิบัติงานเชื่อมโดยใช้พารามิเตอร์มาตรฐาน นอกจากนี้ข้อมูลการเกิดความเค้นตักในชิ้นงานสามารถนำไปประกอบการคำนวณความแข็งแรงและการรับภาระของชิ้นงานหรือโครงสร้างที่ใช้การเชื่อมประกอบได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณ บริษัท เอ็มซีเอส สตีล จำกัด (มหาชน) บริษัท คิวทีซีเอ็นเนอร์ยี จำกัด (มหาชน) ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรม



เครื่องกล และการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ที่ได้ดูแลและรับผิดชอบ เครื่องเชื่อม เช่น เซอร์เครื่องมืออุตสาหกรรมและการก่อสร้างของชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มจพ.

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	ขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนในแกนที่ 1 ของระบบพิกัดฉาก, mm
A	ค่าคงที่การแผ่รังสีความร้อน, $\text{mJ}/\text{mm}^3 \cdot \text{K}$
b	ขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนในแกนที่ 2 ของระบบพิกัดฉาก, mm
B_b	ความหนาของรอยเชื่อม, mm
B_l	ความยาวของรอยเชื่อม, mm
B_w	ความกว้างของรอยเชื่อม, mm
c	ขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนในแกนที่ 3 ของระบบพิกัดฉาก, mm
E	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นวัสดุ, MPa
E_h	ความสูงวงรี, mm
E_w	ความกว้างวงรี, mm
f	ฟลักซ์ความร้อน, mJ/mm^2
$f_{f,r}$	ตัวประกอบของการกระจายตัวด้านหน้าและด้านหลัง
g	แหล่งความร้อนภายนอกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, mJ/mm^3
G	ค่าโมดูลัสเฉือนวัสดุ, MPa
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$
I	ค่ากระแสไฟฟ้า, A
k	เมตริกซ์ของการนำความร้อน, $\text{mJ}/\text{mm} \cdot \text{K} \cdot \text{sec}$
q	ฟลักซ์ความร้อน, mJ/mm^2
q_{max}	ฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดความร้อน, mJ/mm^2
Q	พลังงานความร้อนของการอาร์ก, mJ

r	ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดความร้อนถึงจุดใด ๆ, mm
R	รัศมีของบริเวณที่เกิดความร้อน, mm
S	พื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม, mm^2
S_{ii}	ความเค้นตกค้างหลักในวัสดุตามแกนพิกัดฉาก ($i = 1, 2, 3$), MPa
SF	ค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดรอยเชื่อม (Size Fraction)
t	เวลา, sec.
T	ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม, cm/min
U_i	การกระจัดที่โหนดตามแกนพิกัดฉาก ($i = 1, 2, 3$)
\dot{U}	อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในต่อเวลา, mJ/s
v	ความเร็วการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดความร้อน, mm/s
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า, V
Vol	ปริมาตรของปริมาตรควบคุม, mm^3
x	ตำแหน่งในแกนที่ 1 ของระบบพิกัดฉาก, mm
y	ตำแหน่งในแกนที่ 2 ของระบบพิกัดฉาก, mm
z	ตำแหน่งในแกนที่ 3 ของระบบพิกัดฉาก, mm
α	การขยายตัวอุณหภาพ, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
δ_{ij}	เดลตาโครเนกเกอร์
ϵ_{ij}	เทนเซอร์ความเครียดในเนื้อวัสดุ
σ_{ij}	เทนเซอร์ความเค้นในเนื้อวัสดุ, MPa
θ	อุณหภูมิ, K
θ^0	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, K
θ^z	อุณหภูมิต่ำสุดสัมบูรณ์, K
v	อัตราส่วนปัวซอง
ζ	ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของงานเชื่อม
ρ	ความหนาแน่นของวัสดุ, $10^3 \text{kg}/\text{mm}^3$
Δ	ระยะการโค้งตัวของชิ้นงานเชื่อม, mm

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. K. Bate, D. Green, and D. Buttle, "A review of residual stress distribution in welded joints for the defect assessment of offshore structures," Health and safety executive, Offshore Technology Report, 1997.



- [2] J. H. Argyris, J. Szimmat, and K. J. Willam, "Computational aspects of welding stress analysis," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 33, pp. 635–666, 1982.
- [3] E. Friedman, "Thermomechanical analysis of the welding process using the finite element method," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 97, pp. 206–213, 1975.
- [4] Dassault Systèmes, *Abaqus Theory Manual*, 2010.
- [5] D. Rosenthal, "The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments," *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, vol. 68, pp. 849–865, 1949.
- [6] R. R. Rykalin, "Energy sources for welding," *Welding in the World*, vol. 12, pp. 227–248, 1974.
- [7] J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby, "A new finite element model for welding heat sources," *Metallurgical Transactions B*, vol. 15B, pp. 299–305, 1984.
- [8] J. N. DuPont and A. R. Marder "Thermal efficiency of arc welding processes," *Welding Research Supplement*, vol. 74, pp. 406s-416s, 1995.
- [9] C. Bai-Qiao, "Prediction of heating induced temperature fields and distortions in steel plates," Master thesis, Naval architecture and marine engineering, Universidade técnica de Lisboa, 2011.
- [10] A. Pilipenko, "Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding," Ph.D. dissertation, Department of machine design and materials technology, Norwegian university of science and technology, 2001.
- [11] *The American Society of Mechanical Engineers*, ASTM STS-1-2006 (Revision of ASME STS-1-2000), "Steel stacks," 2006, pp. 59.
- [12] *International welding engineer guideline*, Doc. IAB-002-2000/EWF-409 Rev. 2, Submerged arc welding I and II, *IWE: Part 1-Module 1 Welding Processes and Equipment*, 2000, pp. 1–10.
- [13] N. Khajohnvuttitragoon and C. Srikunwong, "Modeling of double-ellipsoidal heat source for submerged arc welding process," Presented at the 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang mai, Thailand, 2014.
- [14] T-L. Teng and C-C. Lin, "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, pp. 857–864, 1998.
- [15] C. Srikunwong, T. Dupuy, and Y. Bienvenu, "Influence of electrical-thermal physical properties in resistance spot welding modelling," *Mathematical Modelling of Weld Phenomena VII*, pp. 999–1024, 2005.