KKU Engineering Journal
http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทานโดยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

The study of temperature distribution in steel rods welded by friction welding using computer simulation

ปกรณ์ อุ่นไธสง ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์* รัชดา โสภาคะยัง และ สมญา ภูนะยา

Pakorn Auntaisong, Chawalit Thinvongpituk*, Ratchada Sopakayang and Somya Poonaya

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand.

Received March 2014

Accepted August 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยศึกษาจากการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) และเงื่อนไขที่ใช้คำนวณเป็นแบบ 2D ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง FEA จะถูกเทียบกับผลการทดลองวัดอุณหภูมิ วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุประเภทเหล็กคาร์บอนต่ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm ยาว 80 mm ระยะที่วัดอุณหภูมิห่างจากพื้นที่หน้าตัด 3 6 และ 9 mm ทดลองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 3 ชุด เพื่อให้เกิดแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากการเปรียบเทียบผลแบบจำลอง FEA และการทดลอง พบว่า ในช่วงแรกค่าของอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าจากแบบจำลอง FEA แต่เมื่อเครื่องทำงานเข้าสู่สภาวะปกติ ผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลของแบบจำลอง FEA มาก โดยพบว่า ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง FEA และจากการทดลองทั้ง 3 ชุด มีความแตกต่างกันเฉลี่ยประมาณ 5.6% 7.3% และ 14% ในชุดที่ 1 1.6% 9.3% และ 9.4% ในชุดที่ 2 และ 0.3% 0.4% และ 0.9% ในชุดที่ 3 นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์กราฟของอุณหภูมิ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มแรงดันเสียดทานและเวลาเสียดทานขึ้น ค่าอุณหภูมิของรอยเชื่อมจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งปรากฏการณ์นี้ มีผลที่สอดคล้องกัน ทั้งจากการทดลองและจากแบบจำลอง FEA ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า แบบจำลอง FEA ที่ใช้สามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ : การกระจายตัวของอุณหภูมิ เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน เหล็กคาร์บอนต่ำ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This study is aimed to investigate the temperature distribution in steel rods welded by friction welding. The study is conducted by experiment and FEA simulation and conditions for calculations is from 2D. The experiment is conducted using low carbon steel rods with a diameter 15 mm and 80 mm long. The temperature is measured at the distance of 3, 6 and 9 mm. The welding conditions are designed in 3 sets in order to compare. The experimental result is compared with FEA. It is found that the temperature archived

* Corresponding author. Tel.: +66-4535-3309 ; fax: +66-4535-3308
Email address: papa_a15@hotmail.com (Auntaisong, P.), chawalit@rocketmail.com* (Thinvongpituk, C.), aero0077@yahoo.com (Sopakayang, R.), somyanew@hotmail.com (Poonaya, S.)
doi: 10.14456/kkuenj.2015.18

from experiment is lower than that of FEA in the beginning of the welding process. However, the result from experiment is agreed very well with the FEA result after the welding process is steady. The average differences of maximum temperature between FEA and experiment from 3 sets are about 5.6%, 7.3% and 14% for group 1, 1.6%, 9.3% and 9.4% for group 2 and 0.3%, 0.4% and 0.9% for group 3 in averages. In addition it is revealed that when the friction process and friction temperature increases the temperature rise is also increased. This phenomena is similar for both FEA and experiment. This implies that the FEA model can be used to predict the temperature distribution in welding process.

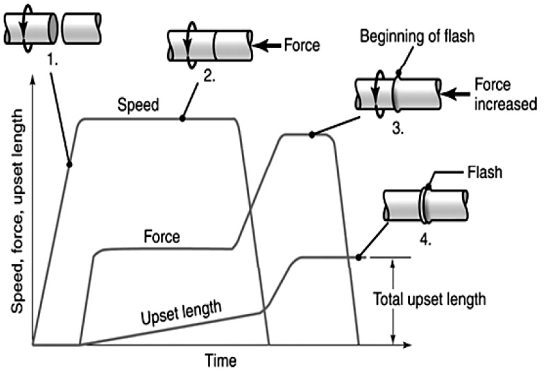
Keywords : Temperature distribution, Friction welding, Low carbon steel, Finite element analysis

1. บทนำ

การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน (Friction Welding) เป็นการเชื่อมที่กำลังได้รับความนิยมในหลายอุตสาหกรรม กระบวนการเชื่อมสามารถทำได้โดย นำโลหะที่จะเชื่อมชิ้นหนึ่งยึดอยู่กับที่อีกชิ้นหนึ่งหมุนด้วยความเร็ว (Speed) คงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นเพิ่มแรงดันในแนวแกน (Force) ดันให้ชิ้นงานที่อยู่กับที่ให้เสียดทานกับชิ้นงานที่หมุนอยู่ ส่งผลให้เกิดความร้อนทั่วบริเวณพื้นที่เสียดทาน เมื่อชิ้นงานทั้งสองเข้าสู่สภาวะเกือบหลอมละลายซึ่งจะเห็นเป็นโซนของความร้อนบริเวณรอยเชื่อมอย่างชัดเจน จึงทำการหยุดหมุนพร้อมทั้งใช้แรงดันในแนวแกนที่มีค่าเท่ากันหรือมากกว่าเดิมอัดชิ้นงานให้ติดกันอย่างรวดเร็ว ซึ่งในสถานะนี้โลหะที่ร้อนจะเย็นตัวลงภายใต้แรงดันอัดอย่างรวดเร็วและเกิดการเชื่อมต่อที่แข็งแรง [1-2] ดังแสดงในรูปที่ 1

อิทธิพลของตัวแปรเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อมนั้นส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูง และวัสดุเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Flash) บริเวณรอยต่อจากการเชื่อมอย่างเด่นชัด ซึ่งในการเสียรูปนี้จะกำหนดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน เช่น เศษออกไซด์จากบริเวณรอยเชื่อม และทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อมได้ [4-5] สำหรับข้อดีของการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้นก็มีอยู่หลายประการ

เช่น ใช้ระยะเวลาในการเชื่อมสั้น ไม่ต้องใช้ช่างฝีมือ รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงเพราะเชื่อมผสานติดกันทั้งพื้นที่หน้าตัด สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ ประหยัดพลังงาน รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1 กระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน [3]

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในระยะเวลาสามสิบกว่าปีที่ผ่านมา การวิจัยและพัฒนาการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานได้รับความนิยมเป็นอย่างมากทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง ทั้งในประเทศและต่างประเทศ ล้วนมีการนำเอางานวิจัยที่ตนเองได้ศึกษาแล้วมานำเสนอ ส่งผลให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานอย่างหลากหลาย ซึ่งจะยกตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

เบื้องต้นงานวิจัยในประเทศที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ การศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมของเหล็กกลมคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม [6] การศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ซึ่งได้แก่ อิทธิพลของเวลาและความเร็วรอบในการเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 จากการทดลองพบว่าที่เวลา 6 วินาที และ ความเร็วรอบ 1,300 rpm ให้ค่าความ

แข็งแรงสูงสุด [7] นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยศึกษาเทียบกับตัวแปรอื่นๆ เช่น เวลาในการอัด (Upset time) แรงดันในการอัด (Upset pressure) แรงดันในการเสียดทาน (Friction pressure) และความเร็วรอบ (Speed) ตัวอย่างผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันอัดสูงขึ้น แนวโน้มของความแข็งแรงจะสูงขึ้นตามแรงดัน และเวลาอัดที่ 4 วินาที จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด [8]

สำหรับการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) การเสียรูปของวัสดุ (Material deformation) ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และพลังงาน (Energy) ที่เกิดจากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้นมีนักวิจัยที่ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เช่น Sluzalec ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ (2D Axisymmetry) โดยวิธี FEA ในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน และเป็นงานวิจัยแรกๆ ที่นำเสนอกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่ส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ทำการทดลอง ผลพบว่าแบบจำลองแบบ 2 มิติ (2D Axisymmetry) เหมาะสมและใช้ได้กับกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน [9] ต่อมา Sahin ได้ใช้ซอฟแวร์คอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่มีพื้นที่หน้าตัดต่างกัน เพื่อดูลักษณะของรอยเชื่อมแล้วเปรียบเทียบผลกับการทดลอง ผลพบว่า การสร้างแบบจำลองและการทดลองให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และยังให้ความสำคัญต่อการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในซอฟแวร์ [10] นอกจากนี้ Li และคณะ ยังได้สร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ (2D) ตามประเภทของการเชื่อมเสียดทานในแบบต่างๆ โดยทำการศึกษากลไกการเกิดและกระจายตัวของความร้อน ผลการศึกษาพบว่า การเชื่อมเสียดทานแบบใช้แรงดันอัดด้านเดียว ใช้วัสดุเหล็กคาร์บอนต่ำ อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มกระบวนการแล้วคงที่ประมาณ 1,200°C ส่วนการเชื่อมท่อแบบใช้แรงดันอัดด้านเดียว ใช้วัสดุประเภท ซุปเปอร์อัลลอยด์ FGH96 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจากพื้นที่หน้าตัดสู่ระยะ 2 mm และ 4 mm ประมาณ 1,130°C 1,030°C และ 750°C ตามลำดับ และการเชื่อมเสียดทานแบบเชิงเส้น ใช้วัสดุเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำ กว้าง 18 mm ยาว 45 mm ผลพบว่าเมื่อเริ่มกระบวนการอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและชันขึ้นเป็นเส้นตรงอุณหภูมิประมาณ 750°C แล้วลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อหยุดกระบวนการ [11]

การวัดอุณหภูมิในการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานในเบื้องต้นนั้นมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่หนึ่งเป็นการใช้กล้องวัดอุณหภูมิอินฟาเรด วิธีนี้จะสามารถวัดอุณหภูมิที่บริเวณพื้นที่เสียดทานได้ ซึ่งเราจะเห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างชัดเจน [12] และวิธีที่สอง คือ การวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคับเปิ้ล ซึ่งจะเชื่อมสายวัดอุณหภูมิให้ติดกับชิ้นงานที่ไม่ได้หมุนให้ได้ระยะห่างจากพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ 2 mm ขึ้นไป ตามความยาวของแท่งเหล็ก เพื่อทำการเปรียบเทียบผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามระยะที่ทำการวัด [13] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเบื้องต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการทดลองวัดอุณหภูมิในเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองโดยวิธี FEA ในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้เหล็กคาร์บอนต่ำ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ จากผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นจากการเสียดทาน สู่บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการสร้างแบบจำลองจะถูกเทียบกับผลการทดลองวัดอุณหภูมิ เพื่อดูลักษณะของแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิ

3. วิธีการวิจัย

ต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายถึงกระบวนการสร้างแบบจำลองและการทำการทดลองวัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะกึ่งคงที่ของของแข็ง (Semi-Infinite Solid) เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนอีกวิธีหนึ่ง กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์ปัญหาสำหรับของแข็งที่มีความยาว ยกเว้นด้านหนึ่งของระบบที่สามารถกำหนดเป็นพื้นผิวความร้อนได้ และเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งที่ผิวสัมผัสจะเกิดการนำความร้อนที่ไม่คงที่ (Transient heat conduction) ซึ่งจะส่งผลต่อระยะ x ดังสมการ (1) [14]

$$x = 4\sqrt{at} \quad (1)$$

โดยที่ a คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และ t คือ เวลา เพื่อประมาณค่าโซนความร้อนที่ได้รับผลกระทบ

การเกิดความร้อนในระหว่างการเสียดทานจะทำให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) บริเวณรอยต่อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการกระจายตัวของความร้อน (Heat flux) บริเวณพื้นที่หน้าตัด แสดงไว้ในสมการ (2)

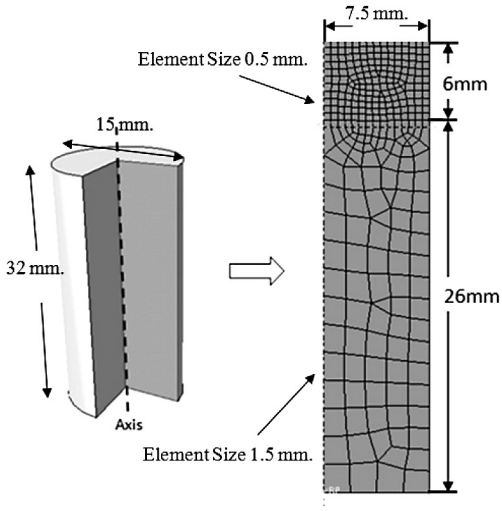
$$q = \frac{\eta\tau\omega r^2}{R} + (1+\eta)\tau\omega R \quad (2)$$

จากสมการ q คือ ฟลักซ์ความร้อนบริเวณพื้นที่หน้าตัด h คือ สัมประสิทธิ์ที่มีความสัมพันธ์ต่อการกระจายตัวของแรงดันบริเวณพื้นที่หน้าตัด t คือ ความเค้นเฉือน w คือ ความเร็วรอบ r คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบของชิ้นงาน R คือ รัศมีของชิ้นงาน

3.2 การสร้างแบบจำลอง

แบบจำลอง FEA ที่ใช้ในการศึกษาจะจำลองตามลักษณะของชิ้นงานจริง คือ มีความยาว 80 mm พื้นที่หน้าตัด 15 mm เพื่อให้ได้รูปร่างของแบบจำลอง FEA ที่เหมาะสมและเพื่อลดจำนวนของเอลิเมนต์ รวมถึงลดระยะเวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ จึงทำการลดความยาวของชิ้นงานลงกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวเดิม โดยลดความยาวลงให้เหลือ 32 mm และกว้างครึ่งหนึ่งของความกว้างเดิม คือ 7.5 mm สำหรับการลดความกว้างและความยาวลงให้เหลืออย่างละครึ่งนั้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อการคำนวณใดๆ ในแบบจำลอง เพราะส่วนที่ให้ความสนใจและให้ความสำคัญ คือ จุดที่ทำการบันทึกอุณหภูมิตามการทดลอง คือ ที่ระยะ 3 6 และ 9 mm เพราะฉะนั้นระยะที่ตัดออกจึงไม่ใช่ระยะที่ต้องการศึกษา

แบบจำลอง FEA ที่สร้างขึ้นจะใช้เอลิเมนต์ด้วยแผ่นบาง (Shell element) ชนิด 2D Axisymetric [11] แบบ CGAX4HT: A4-node โดยทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ความร้อนมีอิทธิพลมาก มีระยะประมาณ 0-6 mm จากหน้าสัมผัส จะใช้เอลิเมนต์ละเอียดเพื่อความแม่นยำของข้อมูล ส่วนช่วงที่ความร้อนมีอิทธิพลน้อย คือ ที่ระยะประมาณ 6 mm เป็นต้นไป จะใช้เอลิเมนต์ที่หยาบลง เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ ทั้งนี้ ส่วนที่เอลิเมนต์มีความละเอียดมีขนาดเท่ากับ 0.5 mm ส่วนเอลิเมนต์หยาบมีขนาดประมาณ 1.5 mm รูปที่ 2 แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง FEA



รูปที่ 2 การกำหนดเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง FEA

ทั้งนี้จะสังเกตว่าลักษณะของเอลิเมนต์ตรงช่วงรอยต่อระหว่างเอลิเมนต์ละเอียดและเอลิเมนต์หยาบนั้นจะมีการบิดเบี้ยวเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์ ทำให้เกิดการโหนดร่วมกันในบางเอลิเมนต์

หลังจากที่สร้างแบบจำลอง FEA ของทั้งสองชิ้นงานแล้ว จากนั้นจะถูกนำมาเชื่อมต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 แล้วใส่ภาระภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกับการทดลอง โดยแบบจำลอง FEA มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

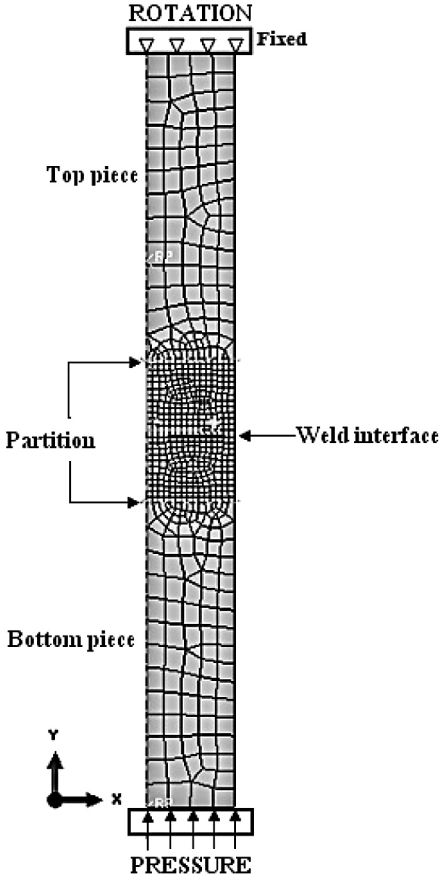
(1.) ชิ้นงานด้านบน (Top piece) กำหนดให้ขอบด้านบนไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y ได้ (Fixed) และกำหนดให้ชิ้นงานหมุนรอบแกน Y ด้วยความเร็วรอบที่กำหนด

(2.) ชิ้นงานด้านล่าง (Bottom piece) กำหนดให้รับภาระแรงดัน (Pressure) ที่ขอบด้านล่างสุด และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานด้านบนในแนวแกน Y ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง

(3.) ที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นล่างและชิ้นบนกำหนดให้มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานซึ่งเปลี่ยนแปลง

ไปตามอุณหภูมิของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

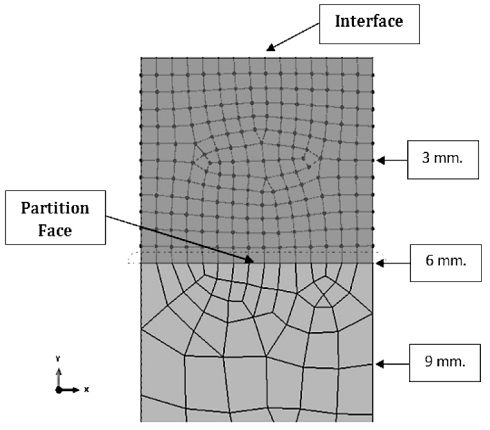
(4.) ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส กำหนดในรูปฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน



รูปที่ 3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของทั้งสองชิ้นงาน (Boundary Condition, BC)

สำหรับการบันทึกผลข้อมูลจากแบบจำลอง FEA นั้น จะกำหนดให้บันทึกผลที่โหนด (Node) ซึ่งอยู่บริเวณขอบของชิ้นงาน ตามระยะที่ทำการทดลองวัดอุณหภูมิ คือ ห่างจากหน้าสัมผัสเป็นระยะ 3 6 และ 9 mm ดังแสดงในรูปที่ 4

สำหรับการบันทึกผลในลักษณะนี้ Seli H และคณะ [15] ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเชื่อมเสียดทานระหว่าง Mild Steel-Al6061-Aluminium ซึ่งแผ่น Al6061 จะอยู่ตรงกลาง ผลพบว่า การบันทึกอุณหภูมิที่โหนดนั้นสามารถทำได้ และโหนดที่อยู่บริเวณขอบของชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงกว่าโหนดที่อยู่บริเวณจุดกึ่งกลางของพื้นที่เสียดทาน



รูปที่ 4 การกำหนดจุดบันทึกอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

จากผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยเครื่อง Spectrometer พบว่า วัสดุที่ใช้ทดลองเชื่อมเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ 0.12% ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ [16] กับ Kimura และคณะ [17] ที่ได้สร้างแบบจำลองและคำนวณอุณหภูมิจากการเชื่อมเสียดทานโดยใช้เหล็กคาร์บอนต่ำ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficient) แสดงไว้ในตารางที่ 2 และค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) โดยมีค่าการนำความร้อนและ (Thermal conductivity) ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

3.4 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลองมีทั้งเงื่อนไขที่เป็นตัวแปรและเงื่อนไขที่เป็นค่าคงที่ โดยเงื่อนไขที่เป็นตัวแปร ได้แก่ แรงดันเสียดทาน (Friction pressure) มีขนาด 20 30 และ 40 bar เวลาเสียดทาน (Friction time) มีขนาด 15 18 และ 21 วินาที ส่วนเงื่อนไขที่คงที่ ได้แก่ แรงดันอัด (Upset pressure) เวลาอัด (Upset time) และ ความเร็วรอบ (Speed) สำหรับเงื่อนไขที่เป็นตัวแปรนั้น จะเป็นส่วนที่ใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ เงื่อนไขที่ใช้ในแบบจำลอง FEA เป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ (wt%)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
Low carbon Steel	0.12	0.24	0.31	0.01	0.01	0.32	0.004	0.037	0.015	0.049

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้ในแบบจำลอง FEA

Temperature °C	20	200	400	600	800	1,000	1,200
Friction Coefficient	0.4	0.577	0.577	0.577	0.4	0.2	0.1

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กคาร์บอนต่ำ

Temperature °C	27	100	200	400	600	800	1000	1200
Thermal conductivity (W/mK)	51.6	51.1	49.0	42.7	35.6	26.0	5	0.6
Specific heat (J/kgK)	473	486	520	599	749	950	644	661

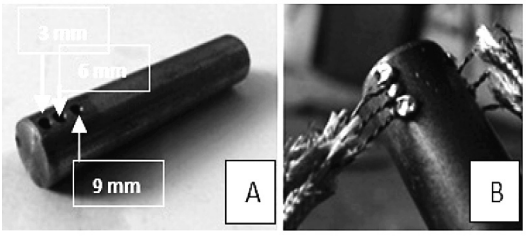
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทดลองและแบบจำลอง FEA

Exp	Friction Pressure (bar)	Friction Time (sec)	Upset Pressure (bar)	Upset Time (sec)	Speed (rpm)
1	20	15	60	5	1,300
2	30	18	60	5	1.300
3	40	21	60	5	1,300

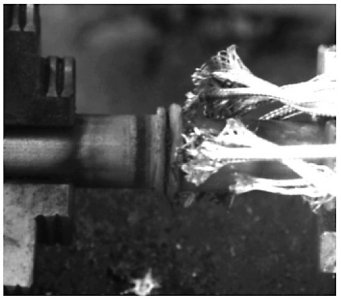
3.5 การวัดอุณหภูมิ

ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิจากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง FEA โดยในส่วนของการทดลองนั้น ทำการวัดอุณหภูมิโดยการเจาะชิ้นงานให้ลึกประมาณ 3 mm ห่างจากหน้าสัมผัสเป็นระยะ 3 6 และ 9 mm รวมเป็น 3 จุด และเจาะเป็นแนวรอบชิ้นงาน 3 แนว รวมทั้งหมดเป็น 9 จุด เพื่อทำการเชื่อมสายวัดอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5A จากนั้นเชื่อมสายวัดอุณหภูมิ (เทอร์โมคับเปิ้ล ชนิด K) ตามรูที่ทำการเจาะ ซึ่งชิ้นงานที่ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิจะเป็นชิ้นงานที่ไม่ได้หมุน โดยจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไขแล้วเฉลี่ยผลการทดลอง ทำการบันทึกผลโดยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

ลักษณะการเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิกับระยะที่ทำการวัด แสดงในรูปที่ 5B และลักษณะของชิ้นงานเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเชื่อม แสดงในรูปที่ 6



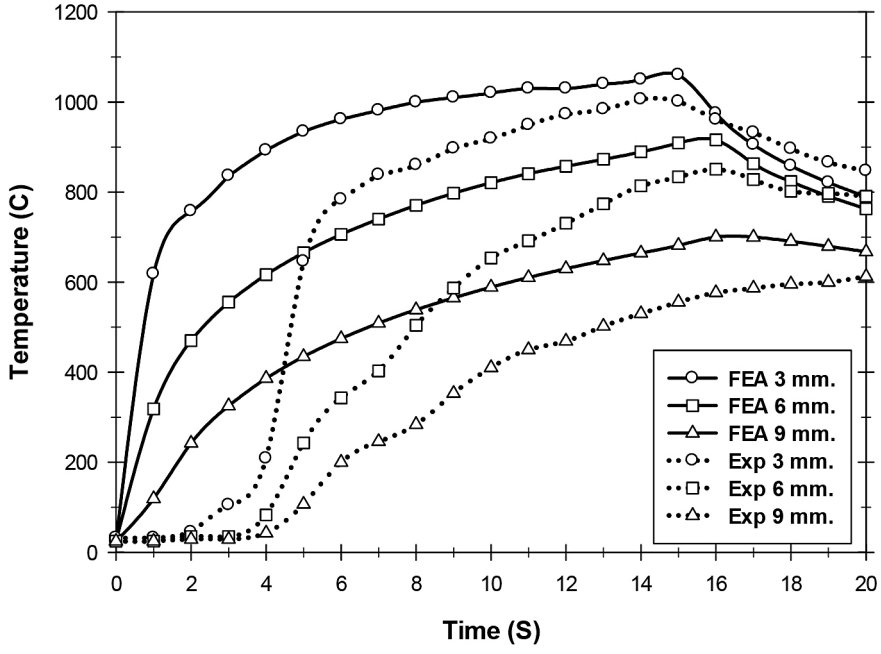
รูปที่ 5 ลักษณะการเจาะรูเพื่อติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ



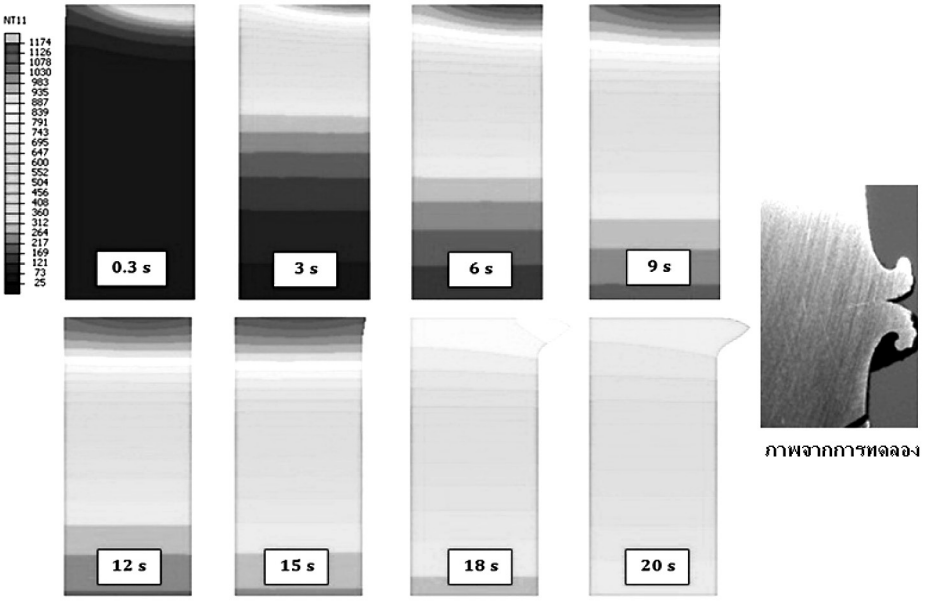
รูปที่ 6 ลักษณะของชิ้นงานเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

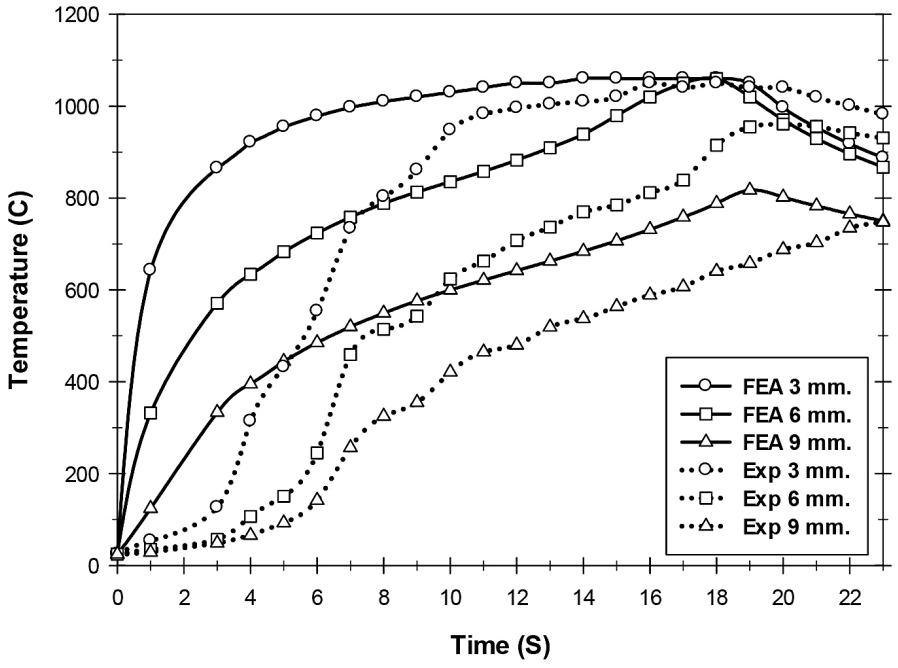
การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง FEA และการทดลอง จะได้รับอิทธิพลภายใต้เงื่อนไขหรือตัวแปรหลัก ซึ่งได้แก่ แรงดันเสียดทาน (Friction pressure) เวลาเสียดทาน (Friction time) แรงดันอัด (Upset pressure) เวลาอัด (Upset time) และความเร็วรอบ (Speed) ซึ่งแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 ชุด ตามรายละเอียดในตารางที่ 4



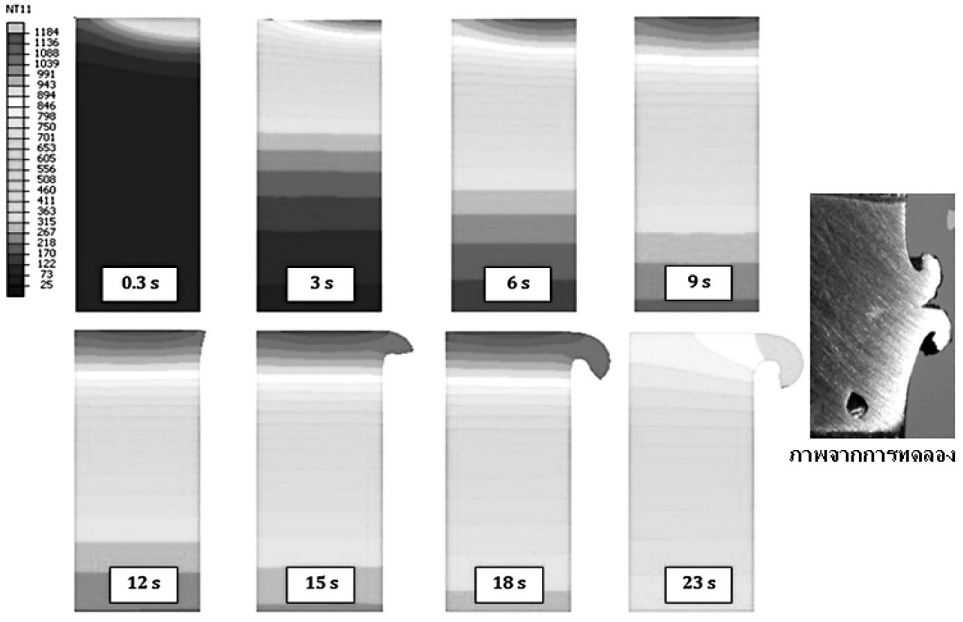
รูปที่ 7 กราฟเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลอง FEA กับการทดลองในเงื่อนไขชุดที่ 1



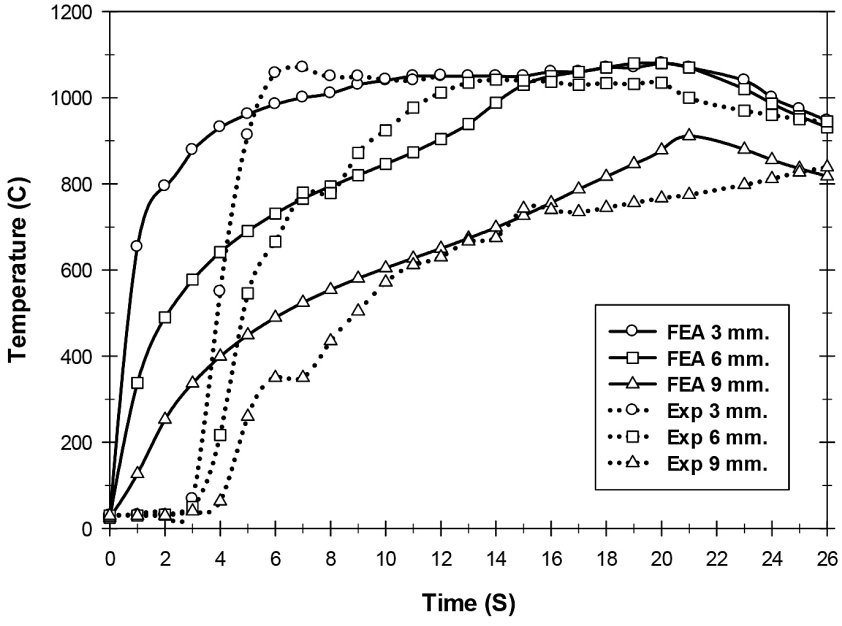
รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA ของเงื่อนไขชุดที่ 1



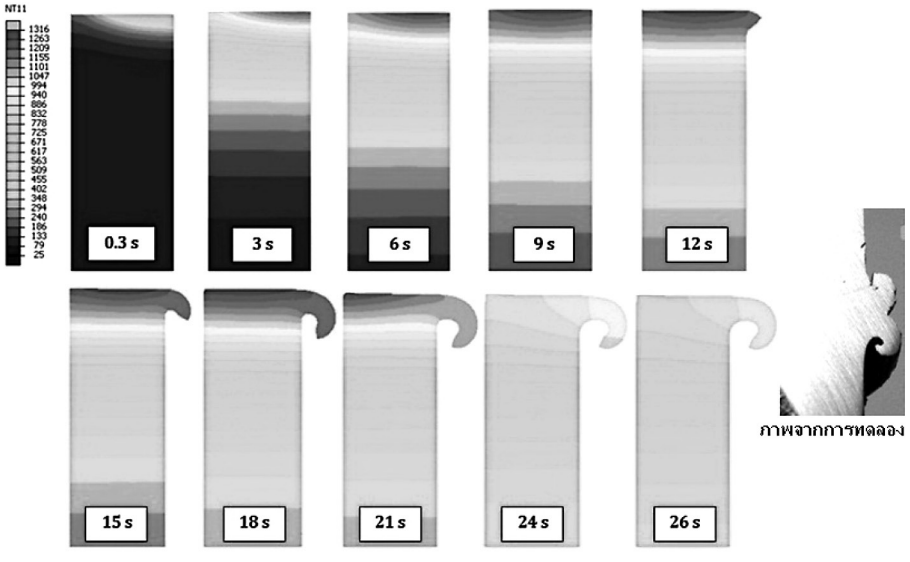
รูปที่ 9 กราฟเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลอง FEA กับการทดลองในเงื่อนไขชุดที่ 2



รูปที่ 10 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA ของเงื่อนไขชุดที่ 2



รูปที่ 11 กราฟเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลอง FEA กับการทดลองในเงื่อนไขที่ 3



รูปที่ 12 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA ของเงื่อนไขชุดที่ 3

จากกราฟในรูปที่ 7 9 และ 11 เมื่อพิจารณาเทียบผลกัน ระหว่างการทดลองและแบบจำลอง FEA พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการ (0-5 วินาที) อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองและแบบจำลอง FEA นั้น มีผลค่อนข้างที่จะแตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากในการทดลองจริงๆ นั้นเครื่องเชื่อมต้องใช้เวลาในการทำความเร็วรอบและสร้างแรงดัน เพื่อให้เกิดความร้อนที่ผิวสัมผัส ดังนั้น ในช่วงแรกๆอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง จึงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง FEA อย่างไรก็ตามหลังจากผ่านช่วงแรกของการเชื่อมไปแล้ว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง เริ่มพุ่งสูงขึ้นจนเกือบใกล้เคียงกับแบบจำลอง FEA โดยเฉพาะในช่วงท้ายของการเชื่อม

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเงื่อนไขชุดที่ 3 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เพิ่มตัวแปรแรงดันเสียดทานมากที่สุด ส่งผลให้อุณหภูมิพุ่งขึ้นเร็วกว่าและสูงกว่าเงื่อนไขชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2

นอกจากนี้ หากนำค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง FEA มาคำนวณหาค่าความแตกต่างเฉลี่ยโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะพบว่า ในเงื่อนไขชุดที่ 1 ความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 5.6% 7.3% และ 14% ที่ระยะ 3 6 และ 9 mm ตามลำดับ เงื่อนไขชุดที่ 2 ความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 1.6% 9.3% และ 9.4% ที่ระยะ 3 6 และ 9 mm ตามลำดับ เงื่อนไขชุดที่ 3 ความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.3% 0.4% และ 9% ที่ระยะ 3 6 และ 9 mm ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลจะเห็นว่า อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้จากการทดลองและแบบจำลอง FEA มีความแตกต่างกันมากที่สุด 14%

จากรูปที่ 8 10 และ 12 จะเห็นว่า เมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดการเสียดทาน แหล่งความร้อนจะเกิดขึ้นที่ขอบของชิ้นงานก่อนแล้วจึงกระจายตัวเข้าสู่แกนกลาง และกระจายตัวออกไปตามความยาวของชิ้นงานเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดที่บริเวณพื้นที่หน้าตัดเสียดทาน และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อชิ้นงานหยุดหมุน โดยพบว่า เงื่อนไขชุดที่ 1 อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,174 °C ที่เวลา 15 วินาที เงื่อนไขชุดที่ 2 อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,184 °C ที่เวลา 18 วินาที เงื่อนไขชุดที่ 3 อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,316 °C เริ่มที่เวลา 18 - 21 วินาที และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่า ในกรณีเงื่อนไขชุดที่ 3 นั้นเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไกลกว่าและสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการใช้แรงดันอัดที่สูงกว่า ส่งผลให้หน้าสัมผัสของชิ้นงานมีการเสียดทานมากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นลดลง และเกิดความร้อนมากขึ้น การที่ใช้แรงดันอัดมากยังส่งผลให้เกิดการไหลของเนื้อโลหะมากขึ้น จึงเกิดการส่งต่อความร้อนได้มากขึ้นจากการไหลของมวลโลหะร้อน

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ทำการศึกษาจากการสร้างแบบจำลอง FEA และเทียบผลกับการทดลอง เงื่อนไขที่ใช้เป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง ซึ่งแบ่งเงื่อนไขการทดลองออกเป็น 3 ชุด โดยแต่ละชุดมีความแตกต่างกันที่แรงดันเสียดทาน (Friction pressure) และเวลาเสียดทาน (Friction time) ที่มีการเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ผลแบบจำลอง FEA และการทดลองมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันและมีทิศทางที่สอดคล้องกัน

ผลการศึกษา พบว่า แบบจำลอง FEA สามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในระดับที่ยอมรับได้ โดยในช่วงแรกพบว่าผลแบบจำลอง FEA มีความแตกต่างกันกับผลการทดลองอยู่พอสมควร เนื่องจาก ในการทดลองนั้นเครื่องเชื่อมต้องใช้เวลาในการเพิ่มความเร็วรอบและแรงดัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเครื่องเชื่อมเข้าสู่สภาวะการทำงานได้เต็มที่แล้ว พบว่า ผลการทดลองและแบบจำลอง FEA ให้ค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันมาก และมีความใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อแรงดันเสียดทานและเวลาเสียดทานเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มแรงดันเสียดทานเป็นการเร่งให้การเชื่อมผลิตความร้อนได้สูงขึ้น และการเพิ่มเวลาเสียดทานเป็นการเพิ่มเวลาให้ความร้อนจากการเชื่อมกระจายตัวออกไปตามความยาวของชิ้นงานได้มากและนานขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและอุปกรณ์การทดลอง รวมถึงคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Arayagkun S, Bootarawong A, Thinvongpituk C. A study of properties of round steel rod joints welded by friction welding. Journal of Ubon Ratchathani University 2009;11(1)83-98. (In Thai).

[2] D'Alvise L, Massoni E, Walloe S J. Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials. Journal of Materials Processing Technology 2002; 125-126:387-391.

[3] Kalpakjian S, Steven RS. Manufacturing Engineering and Technology. 5th ed. New Jersey: pearson education publishing; 2006.

[4] Richard T, Robert R. A plastic model is designed to theoretically describe the movement of interface material during the forging phase of friction welding. Welding Research Supplement 1971:137-146.

[5] Sketchley PD, Threadgill PL, Wright IG. Rotary friction welding of an Fe3Al based ODS alloy. Materials Science and Engineering: A 2002;329-331:756-762.

[6] Arayangkun S, Thinvongpituk C, Payom C. Micro-structure characteristic of the low carbon steel jointed by friction welding. The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand; 2009 November 4-7; Chiang Mai, Thailand. Chaing Mai University; 2009. (In Thai).

[7] Chuppava C, Thinvongpituk C. The influence of friction time and rotational speed on the strength of AISI 1015 steel rods welded by friction welding. Journal of Science and Technology Ubonratchathani University 2011;13(1):73-81. (In Thai).

[8] Chuppava C, Thinvongpituk C. Influerence of friction time on the strength of AISI 1015 steel rods welded by friction welding. UBU Engineering Journal 2010;3(2):17-21. (In Thai).

[9] Sluzalec, A. Thermal effect in friction welding. Journal of Mechanical Science 1990;32(6): 467-478.

[10] Sahin M. Simulation of friction welding using a developed computer program. Journal of Materials Processing Technology 2004; 153-154:1011-1018.

[11] Li W, Shi S, Wang F, Zhang Z, Ma T, Li J. Numerical simulation of friction welding process based on abaqus environment. Journal of Engineering and Technology Review 2012;5(3):10-19.

[12] Rud-di L, Jing-long L, Jing-tao X, Fu-sheng Z, Ke Z, Zhong J C. Friction heat production and atom diffusion behaviors during Mg-Ti rotating friction welding process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2012;22:2665-2671.

[13] Khany SE, Krishnan KN, Wahed MA. Study of transient temperature distribution in a friction welding process and its effects on its joints. International Journal of Computational Engineering Research 2012;2(5):1645-1655.

[14] Li W, Wang F. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. Materials Science and Engineering A 2011;528:5921-5926.

[15] Seli H, Awang M, Izani A, Ismail MD., Rachman E, Ahmad A. Evaluation of Properties and FEM Model of the Friction Welded Mild Steel-Al6061-Alumina. Materials Research 2013;16(2):453-467.

[16] Li WY, Shi SX, Wang FF, Ma TJ, Li JL, Gao DL, Vairis A. Heat reflux in flash and its effect on joint temperature history during linear friction welding of steel. International Journal of Thermal Sciences 2013;67:192-199.

[17] Kimura M, Inoue H, Kasaka M, Kaizu K, Fuji A. Analysis Method of Friction Torque and Weld Interface Temperature During Friction Process of Steel Friction Welding. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 2010;4(3)401-413.