

การจำลองแบบในกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนภายใต้แก๊สปกคลุมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Welding Simulation of TIG Welding by Using Finite Element Technique

เจษฎา แก้ววิชิต¹ สันญา คำจริง^{2*}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)
450 ม. 6 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)

217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

Jesada Kaewwichit¹ Sanya Kumjing^{2*}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Suphanburi),

450 M.6, Suphanburi-Chainat Rd., Yanyao Sub-district, Samchuk District, Suphanburi Province, 72130

²Department of Tool and Die Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Nonthaburi),

217, Nonthaburi Rd., Suanyai Sub-district, Nonthaburi District, Nonthaburi Province, 11000

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

(Received: 11 October 2023 / Accepted: 13 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองสภาวะทางความร้อนในระหว่างการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานขึ้นชิ้นแม่พิมพ์โลหะด้วยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คทั้งสแตน โดยการกระจายตัวทางความร้อนและอัตราการเย็นตัวภายในชิ้นงานจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติและอายุการใช้งานของแม่พิมพ์โลหะ โดยเทคนิคการจำลองแบบทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์แบบจำลองงานเชื่อมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC. Marc Mentat 2008 จำลองแบบเป็น 3 มิติ ขนาด 50 x 80 x 6 มิลลิเมตร วิเคราะห์แบบช่วงเวลา เชื่อมไม่เติมลวด แหล่งความร้อนเคลื่อนที่เป็นแบบ Gaussian disc model สมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิตัวแปรการเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้าเชื่อม 3 ระดับ คือ 65, 100 และ 135 แอมแปร์ แรงดัน 10.5 โวลต์ ความเร็วเชื่อม 1, 3 และ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที หลังจากนั้นนำผลของอัตราการเย็นตัวมาวิเคราะห์กับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (CCT Diagram) เพื่อประมาณค่าความแข็งของวัสดุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในส่วนสุดท้ายจะทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานจริง และนำไปวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ณ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) โลหะงาน (Base metal) จากผลการทดลองเมื่อทำการเปรียบเทียบ ค่าประมาณความแข็ง ณ บริเวณชิ้นงานเชื่อมต่าง ๆ จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และค่าวัดจากชิ้นงานทดลองพบว่าค่าประมาณความแข็งจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าวัดจากชิ้นงานทดลอง ซึ่งแนวทางวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมเชื่อมชิ้นส่วนแม่พิมพ์โลหะที่มีผลกระทบต่อสมบัติการใช้งานต่อไป

คำสำคัญ: การเชื่อมแบบอาร์คทั้งสแตน ไฟไนต์เอลิเมนต์ เหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

Abstract

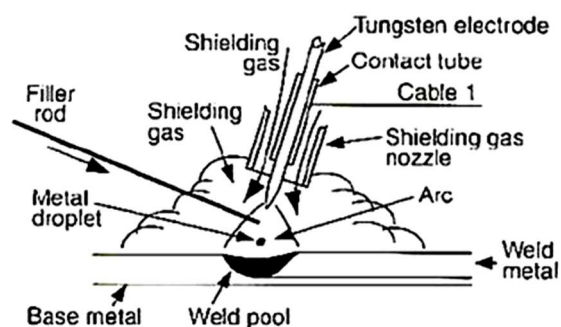
This research presents a simulation of the thermal state during TIG welding in cold work (SKD 11), which is widely used in the tool and die industry. After welding, thermal distribution and cooling rate affect material properties and tool life. Experimental sets, including finite element analysis (FEA) and experiments, and bead-on-plate welding were simulated by the FE program MSC. Marc Mentat 2008, 3D model, specimen size 50x80x6 mm, analysis is based on transient, Gaussian disc model is used for moving heat source, material properties depend on temperature, welding parameters are current 3 levels 65, 100 and 135 A, voltage 10.5 V, welding speed 1, 3 and 5 mm/s. And then, an estimated cooling rate from simulation led to an evaluation of Vicker hardness by the CCT diagram at the weld metal, base metal, and heat-affected zone (HAZ). As the results show, it can be concluded that the hardness values of the FEA simulation agree with the experiment results.

Keywords: TIG welding, Finite element analysis, Cold work SKD 11

1. ที่มาและความสำคัญ

งานเชื่อมเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมมากมาย โดยเฉพาะในงานซ่อมบำรุงชิ้นส่วนแม่พิมพ์ต่างๆ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและเวลาในการเปลี่ยนอะไหล่เมื่อเกิดความเสียหายอย่างไรก็ตาม หากการเชื่อมมีการปฏิบัติหรือกำหนดตัวแปรที่ไม่เหมาะสมจะมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนแม่พิมพ์โลหะ (Tool and die) ลดลงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรงานเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งของ เหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์โลหะนิยมใช้กันทั่วไป ภายหลังจากการเชื่อมแบบอาร์คทังสเตน (TIG Welding)

กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตนภายใต้แก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) เป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมกับงานเชื่อมคุณภาพสูง [1] เป็นการหลอมละลายและเชื่อมต่อวัสดุด้วยความร้อนจากการอาร์คระหว่างแท่งอิเล็กโทรด ซึ่งทำมาจากทังสเตน (Nonconsumable tungsten electrode) และชิ้นงาน โดยมีแก๊สปกคลุม (Shielding Gas) เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอกของบ่อหลอมเชื่อม (Weld pool) และส่งเสริมความเสถียรของอาร์ค (Arc stability) เช่น แก๊สอาร์คอน ฮีเลียม หรือแก๊สผสมระหว่างอาร์คอนและฮีเลียม เป็นต้น การเชื่อมต่อไปจะใช้วิธีหลอมละลายระหว่างโลหะงานเข้าด้วยกันหรือเติมด้วยลวดเชื่อม (Filler rod) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 [1], [2]



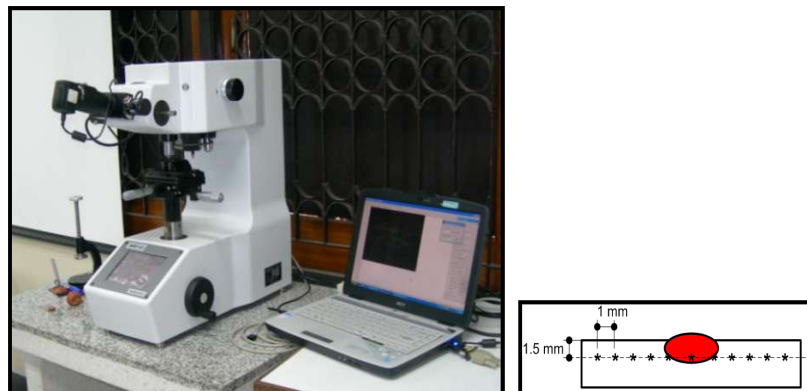
รูปที่ 1 กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตนภายใต้แก๊สปกคลุม [2]

อย่างไรก็ตามถึงแม้รอยเชื่อมของชิ้นงานจากกระบวนการเชื่อม GTAW จะมีคุณภาพสูงแต่ยังคงมีข้อเสียหลายประการ เช่น อัตราการเติมเต็มโลหะเชื่อมต่ำ (Low deposition rate) ผลผลิตต่ำ ระบบแก๊สปกคลุมที่ไม่เหมาะสมหรือกรณีเชื่อมชิ้นงานรูปร่างซับซ้อน ทำให้เกิดรอยบกพร่องในแนวเชื่อมได้ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อการใช้งาน เช่น รอยแตกร้าวเนื่องจาก

ไอโรเจน รูพรุน เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง ณ บริเวณชิ้นงานเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ด้วยการจำลองแบบทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตน (TIG)

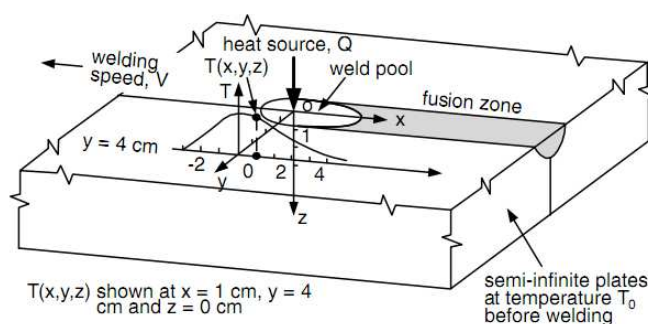
2. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ชิ้นงานเป็นวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแบบอาร์คทังสเตน (TIG -Welding) รุ่น KEMPPi MASTER TIG 2500 ขั้วเคลื่อนหัวเชื่อมอัตโนมัติตามแนวเชื่อม ลักษณะรอยเชื่อมแบบไม่เต็มลวด (Bead on plate) ตัวแปรการเชื่อม (Welding parameters) ที่สำคัญซึ่งคำนึงถึงการใช้งานและสมรรถนะของเครื่องเชื่อมที่ใช้ทดลอง ได้แก่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ 65, 100 และ 135 แอมแปร์ แรงดัน 10.5 โวลต์ ความเร็วเชื่อม 1.2 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้จำนวน 3 ตัวอย่างชิ้นงานทดลอง และภายหลังการเชื่อมชิ้นงานจะถูกวัดค่าความแข็งตำแหน่งลึกจากผิวงาน 1.5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดวัด 1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ Matsuzawa รุ่น MMT-X3 ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องวัดความแข็ง Matsuzawa รุ่น MMT-X3 และตำแหน่งการวัดค่าความแข็งในชิ้นงานเชื่อม

การวิเคราะห์การถ่ายเทของความร้อน (Heat flow) ในงานเชื่อม ณ ตำแหน่งต่างๆ จะทำให้สามารถประมาณการอัตราการเย็นตัว และปัจจัยงานเชื่อมที่เหมาะสมได้ ซึ่งการประมาณค่าเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) ด้วยสมการ Rosenthal เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้เนื่องจากให้ผลการประมาณค่า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้เหมาะสมกว่าสมการการถ่ายเททางความร้อนทั่วไป [2] โดยสมการนี้จะคำนึงถึงเฉพาะสภาวะการนำความร้อน (Thermal conductivity) ในชิ้นงานและคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ คงที่ ดังรูปที่ 2 และสมการที่ 1



รูปที่ 2 ระบบพิกัดของแบบจำลอง Rosenthal [2]

$$\text{สมการ} \quad \frac{2\pi(T - T_0)kR}{Q} = \exp\left(\frac{-V(R - x)}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

T_0 คือ อุณหภูมิชิ้นงานก่อนเชื่อม

k คือ ค่าการนำความร้อน

Q คือ พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน

ซึ่งมาจากผลคูณของกระแสไฟฟ้าเชื่อม แรงดัน และสัมประสิทธิ์สัดส่วนความร้อนที่สู่ชิ้นงาน (η) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า 0.68 [3] เมื่อ

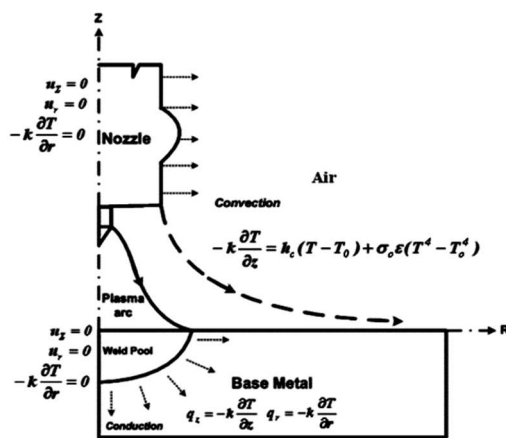
V คือ ความเร็วเชื่อม

α คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของความร้อน (Thermal diffusivity)

R คือ ระยะรัศมีจากลวดเชื่อม ซึ่งคำนวณได้จาก $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

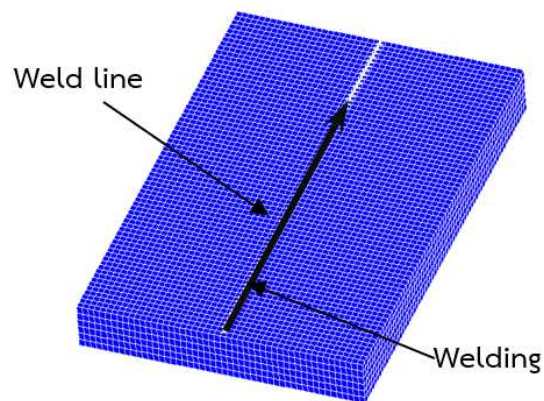
3. การจำลองแบบทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเชื่อมแบบอาร์คทังสแตน

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc Mentat 2008 สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน (Thermal analysis) ในงานเชื่อม ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองชิ้นงานเป็น 3 มิติ ขนาดชิ้นงานขนาด $50 \times 80 \times 6$ มิลลิเมตร ซึ่งจำลองการเชื่อมแบบไม่เติมลวด แหล่งความร้อนเคลื่อนที่ (Moving heat source) แบบ Gaussian disc model สมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ [3, 4, 6] โดยจะคำนึงถึงช่วงเวลา (Transient analysis) ซึ่งแสดงแบบจำลองทางความร้อน ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 แบบจำลองทางความร้อน

ในกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทังสแตน (TIG) [5-6]

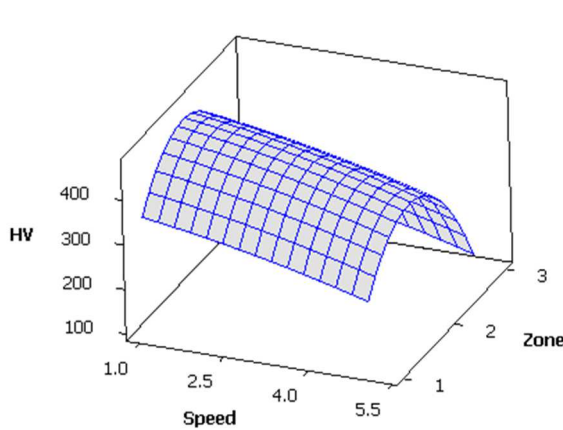


รูปที่ 5 แบบจำลอง (Model) ชิ้นงานเชื่อม

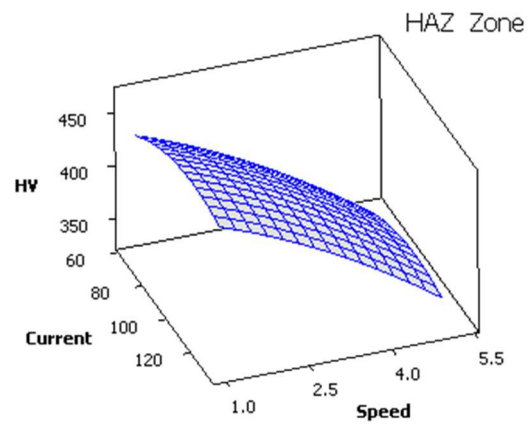
รูปที่ 5 แสดงแบบจำลอง (Model) ชิ้นงานเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร และชนิดอิเลเมนต์ (Element type) เป็นแบบ 3 -D Thermo Mechanical class 8hex.

4. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองได้ทำการวิเคราะห์พื้นผิว (Surface response methology) ซึ่งได้แสดงผลความสัมพันธ์ต่างๆ ดังรูปที่ 6 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความเร็วเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ 1) เนื้อเชื่อม (Weld metal) 2) บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และ 3) โลหะงาน (Base metal) พบว่าความเร็วเชื่อมต่ำจะมีแนวโน้มความแข็งเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณ HAZ เท่ากับ 473.1 HV และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งระหว่างกระแสไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อม ณ บริเวณ HAZ ผลการทดลองแสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งภายหลังการเชื่อมเพิ่มขึ้น คือ กระแสไฟฟ้าเชื่อม ขณะที่ความเร็วมีผลกระทบในทางตรงกันข้าม แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความเร็วเชื่อม ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์

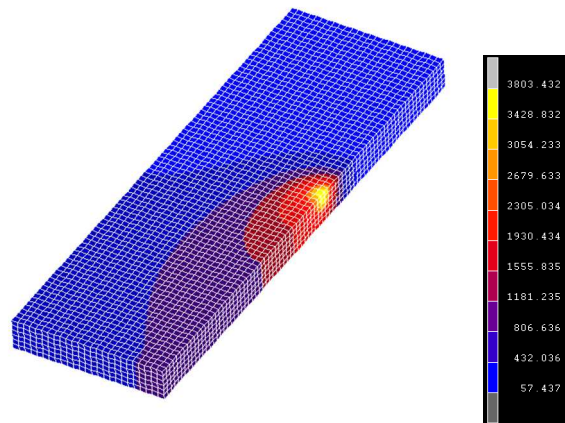


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม

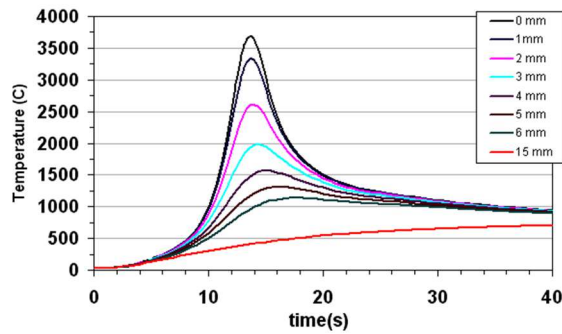
รูปที่ 8 แสดงภาพตัดชิ้นงานเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์ พบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีการหลอมลึก 2 ใน 3 ของความหนาชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ดีและแสดงบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนจากความร้อนมีขอบเขตที่กว้างและเมื่อทำการจำลองการวิเคราะห์ทางความร้อนขณะเชื่อมจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 135 แอมแปร์ ณ เวลา 38 วินาที ดังในรูปที่ 9 แสดงข้อมูลอุณหภูมิในการจำลองการเชื่อมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการกระจายอุณหภูมิทางความร้อนของบ่อหลอมเชื่อมบนชิ้นงานขณะเชื่อมได้สม่ำเสมอและแสดงอุณหภูมิบริเวณตรงกลางบ่อหลอมเชื่อมประมาณ 1181-3428 °C



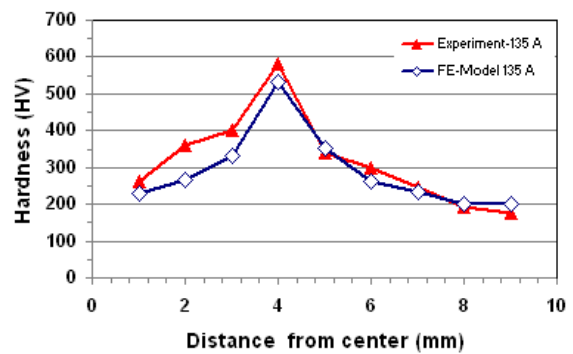
รูปที่ 8 ชิ้นงานเชื่อมด้วย TIG welding



รูปที่ 9 การกระจายอุณหภูมิขณะเชื่อม



รูปที่ 10 เส้นโค้งการเย็นตัวของเชื่อมจากแบบจำลองทางไฟไนเอลิเมนต์



รูปที่ 11 ค่าความแข็งจาก FEM และชิ้นงานทดลอง

รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling curve) ขณะเชื่อม ณ ตำแหน่งห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ระดับกระแสไฟฟ้าเชื่อม 135 แอมแปร์ พบว่าการวัดอุณหภูมิมีระยะห่างจากกึ่งกลางบ่อหลอมเชื่อมมากขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากแนวโน้มความร้อนจุดสูงของอุณหภูมิในเส้นกราฟเส้นโค้งการเย็นตัวมีลักษณะลดต่ำลงจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 11 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าประมาณความแข็งจากการจำลองทางไฟไนเอลิเมนต์ (FEM) และค่าจากชิ้นงานจริงชิ้นงานทดลองที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเชื่อม 1 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าค่าการประมาณในแบบจำลอง FEM กับค่าวัดจากชิ้นงานทดลองมีความสอดคล้องกันและจะแตกต่างกันมากกว่าในบริเวณเนื้อเชื่อม

5. สรุป

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง ณ บริเวณชิ้นงานเชื่อมตำแหน่งต่าง ๆ จากแบบจำลองทางไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าค่าประมาณความแข็งจากระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าวัดจากชิ้นงานทดลอง อย่างไรก็ตามค่าประมาณความแข็งจากแบบจำลองวิธีไฟไนเอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะให้ผลการทำนายได้ใกล้เคียง ณ บริเวณตั้งแต่บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และโลหะงาน (Base metal) ซึ่งแนวทางวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมเชื่อมชิ้นส่วนแม่พิมพ์โลหะที่มีผลกระทบต่อสมบัติการใช้งานต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] American Welding Society, Welding Hand Book, Vol. 1. 2001: Welding Science and technology, 9th ed., American Welding Society, Miami, FL, USA.
- [2] Sindo Kou., Inc 2003. Welding Metallurgy. Second edition. University of Wisconsin: Wiley & Son
- [3] C.S. Wu, J.Q. Gao. 2002. Analysis of the heat flux distribution at the anode of a TIG welding arc. Computational Materials Science, 24: 323–327.
- [4] Dorrenberg Edelstahl GmbH, Material data. www.doerrenberg.de
- [5] I.S. Kim, A. Basu., 1998. A mathematical model of heat transfer and fluid flow in the gas metal arc welding process. Journal of Materials Processing Technology 77: 17–24
- [6] Lu, Xinhua Tang, Hailiang Yu, Shun Yao., 2006. Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool. Computational Materials Science 35: 458–465.