

# การลดปัญหาการโก่งตัวของชิ้นงานในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม

กิตติ วันดี สุจินต์ ชงถาวรสุวรรณ และ วิบูลย์ ตั้งวัชรมนุญกุล\*

## บทคัดย่อ

กระบวนการเชื่อมภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสมมักก่อให้เกิดการโก่งตัวของชิ้นงานเนื่องจากปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปในเนื้อชิ้นงานที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการขยายตัวที่ต่างกันและนำไปสู่การโก่งตัวของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมในที่สุด การผลิตชิ้นส่วนที่ยืดหยุ่นเหมาะสมของกระบวนการเชื่อมประกอบในสายการผลิตเช่นกัน จากการศึกษากระบวนการเชื่อมหุ่นยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา พบว่าชิ้นงานภายหลังกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม (GMAW) เกิดการโก่งตัวมากกว่าค่าพิคคที่ลูกค้ากำหนด คือ 1 มม ขนาดการโก่งตัวที่เกินค่าพิคคนี้ นอกจากจะส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการประกอบในสายการผลิตเรียบร้อยแล้ว ยังส่งผลต่อความสามารถในการรับภาระทางกลที่ไม่เป็นไปตามการออกแบบและคำนวณของวิศวกร งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อลดขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานภายหลังกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน คือ กระแสไฟในการเชื่อม แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และลำดับทิศทางในการเชื่อม ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการลดขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานคือ ค่ากระแสเชื่อม 130 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 19 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 50 ซม/นาที ซึ่งให้ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานที่ยืดหยุ่นเหมาะสมที่ 0.83 มม นอกจากนี้ทิศทางการเชื่อมในแต่ละแนวการเชื่อมควรสลับกันเพื่อกระจายความร้อนจากการเชื่อมบนชิ้นงานให้ใกล้เคียงกันและลดโอกาสที่ด้านใดด้านหนึ่งของชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป ด้วยทิศทางการเชื่อมเช่นนี้ ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการโก่งตัวเฉลี่ยน้อยสุดและอยู่ในพิคคที่ลูกค้ากำหนด

**คำสำคัญ :** การโก่งตัว, กระบวนการเชื่อม, การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม, ชิ้นส่วนยานยนต์, การหาปัจจัยที่เหมาะสม

---

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: viboon.tan@kmutt.ac.th รับเมื่อ 8 มิถุนายน 2558 ตอบรับเมื่อ 21 ธันวาคม 2558

## Reduction of Work Distortion in the Gas Metal Arc Welding Process

Kitti Vandee Sujin Tongthavornsuwan and Viboon Tangwarodomnukun\*

### Abstract

Welding process performed under an improper condition usually causes workpiece deflection due to the different heat energy conducting into each location of workpiece. This results in the different thermal expansion and accordingly introduces the deflection of workpiece after being welded. The manufacturing of leaf spring's holder for automobile also involves the welding process. Based on the welding of such automotive part in a case-studied company, the workpiece obtained after the gas metal arc welding process (GMAW) presented the deflection of greater than 1 mm which is out of the customer's limits. This significant degree of deflection can directly affect the assembling process in the automotive manufacturing and also alters the ability to withstand the mechanical loads to which is not corresponded with the engineer's design and calculation. Therefore, this research aims at decreasing the workpiece deflection after the gas metal arc welding process. The results revealed that the welding current, voltage, speed and welding sequence were the significant factors affecting the work deflection, and the optimum welding parameters for minimizing the deflection were the welding current of 130 A, voltage of 19 V and welding speed of 50 cm/min. This optimum condition can cause the deflection of only 0.83 mm. In addition, the welding sequence associated with the alternating technique can well spread heat evenly in the workpiece, thus decreasing the heat discrepancy of workpiece. By using this welding sequence, the deflection can be minimized and successfully conformed to the customer's requirement.

**Keywords :** Distortion, Welding process, Gas metal arc welding, Automotive part, Optimization

---

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)

\* Corresponding author, E-mail: viboon.tan@kmutt.ac.th Received 8 June 2015, Accepted 21 December 2015

## 1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม (Gas Metal Arc Welding, GMAW) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้มากในการประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่เป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์ แม้ว่ากระบวนการเชื่อมในอุตสาหกรรมจะเป็นแบบอัตโนมัติ เช่น การใช้หุ่นยนต์ในการเชื่อม เพื่อให้ได้คุณภาพรอยเชื่อมที่สม่ำเสมอและมีรอบเวลาในการเชื่อมที่ต่ำลง หากสภาวะในการเชื่อมไม่ได้รับการปรับตั้งอย่างเหมาะสมแล้ว ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมอาจก่อให้เกิดการบิดตัวหรือโก่งตัวของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมได้ ดังนั้นการควบคุมสภาวะและลำดับขั้นตอนของกระบวนการเชื่อมจึงมีความสำคัญและส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จที่ได้

ปัญหาเรื่องการโก่งตัวของชิ้นงานภายหลังกระบวนการเชื่อมเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของบริษัทกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ จากการสำรวจในเบื้องต้นพบว่า ชิ้นส่วนที่ยึดหูแหวนรถยนต์ทุกชิ้นที่ได้ภายหลังกระบวนการเชื่อม เกิดการโก่งตัวมากและต้องทำการเคาะดัด เพื่อให้สามารถนำไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่นๆได้ การเคาะดัดชิ้นงานทุกชิ้นภายหลังกระบวนการเชื่อมเช่นนี้ทำให้บริษัทกรณีศึกษาต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการเคาะดัดเป็นอย่างมาก ส่งผลโดยตรงต่อการผลิตโดยรวม

การบิดงอในงานเชื่อมมักเกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม ความร้อนและการเย็นตัวของชิ้นงานทำให้เกิดความเค้นที่สร้างแรงดึงภายใน ส่งผลให้เกิดการหดตัวของชิ้นงาน นอกจากนี้ รูปแบบการหดตัวและรูปร่างของรอยเชื่อมยังส่งผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของการ

เสีรูปร่างที่ต่างกันไป เช่น การโก่งตัว การงอตัว และการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติของชิ้นงาน [1-3] การควบคุมการบิดงอในงานเชื่อมนั้น ขนาดของการบิดตัวในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม (GMAW) โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับ ความกว้างและความลึกของแนวเชื่อม ลำดับและทิศทางในการเชื่อม สมบัติของวัสดุงานและสภาวะในกระบวนการเชื่อม [4] เพื่อทำนายการบิดงอในกระบวนการเชื่อม

Biswas และคณะฯ [5] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของลำดับในการเชื่อมด้วยวิธีการทางไฟในอลิเมนต์ ผลที่ได้พบว่าลำดับของการเชื่อมในแต่ละรูปแบบส่งผลต่อขนาดและลักษณะการบิดงอของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม นอกจากนี้ Pilipenko [6] พบว่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่แนวเชื่อมยังส่งต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณบ่อหลอมละลาย และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการบิดตัวของชิ้นงานเช่นกัน

Islam และคณะฯ [7] ได้ทำการหาสภาวะในการเชื่อมอาร์กเหมาะสมเพื่อลดการบิดตัวของชิ้นงานปีกนกล่าง (Lower Arm) โดยใช้วิธีการทางไฟในอลิเมนต์ควบคู่กับวิธี Genetic Algorithm ผลการศึกษาที่ได้พบว่าปัจจัยในงานเชื่อมที่ส่งผลต่อการบิดตัวของชิ้นงาน คือ กระแสเชื่อม แรงเคลื่อนไฟฟ้า ความเร็วเชื่อม และลำดับทิศทางในการเชื่อม นอกจากนี้ Casalino และคณะฯ [8] ได้ทำการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อม GMAW เพื่อควบคุมการบิดตัวของชิ้นงาน โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

จากงานวิจัยในอดีตสามารถสรุปได้ว่า ปัญหาเรื่องการโก่งตัวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการ

เชื่อมสามารถทำให้ลดลงได้โดยอาศัยการควบคุมปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมให้เหมาะสม โดยเฉพาะการควบคุมระดับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในระหว่างการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่เพียงพอสำหรับการเชื่อมที่มีระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมและความแข็งแรงของแนวเชื่อมเป็นไปตามต้องการ อีกทั้งระดับความร้อนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานไม่ควรจะมีความแตกต่างกันมากเกินไปจนทำให้การขยายตัวของชิ้นงานไม่เท่ากันและนำไปสู่การโค้งตัวหรือบิดตัวของชิ้นงานในที่สุด

เมื่อพิจารณาปัญหาการโค้งตัวของชิ้นงานที่ยืดหูแหวนรถยนต์ ซึ่งเป็นชิ้นงานกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ การหาสภาวะและลำดับขั้นตอนในการเชื่อมที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้ โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานยืดหูแหวนรถยนต์ภายหลังกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังได้พิจารณาขนาดของการโค้งตัวรวมไปถึงระยะซึมลึกของแนวเชื่อมภายใต้สภาวะในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้ช่วยให้เกิดความเข้าใจต่อกระบวนการเชื่อมและพฤติกรรมการโค้งตัวของชิ้นงานมากยิ่งขึ้น

## 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

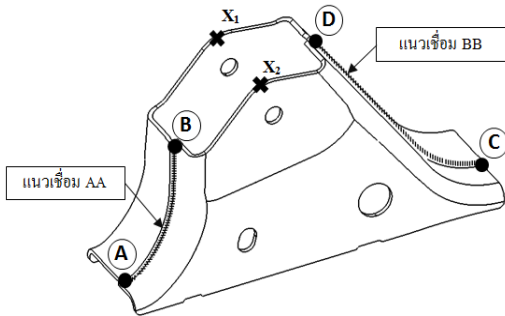
ชิ้นงานกรณีศึกษาที่ใช้คือ ที่ยืดหูแหวนรถยนต์ทำจากเหล็กกล้าวีร์คร็อนเกรด JSH270C หน้า 3.6 mm ดังแสดงในรูปที่ 1 การเชื่อมประกอบมีทั้งหมด 2 แนวและใช้กระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะก๊าซคลุม กระบวนการเชื่อมอาศัยแขนหุ่นยนต์ (ยี่ห้อ Panasonic รุ่น YA-1 NAR61 Y00) ที่ตั้งโปรแกรมการทำงานไว้เพื่อควบคุมตำแหน่งและความเร็วในการเชื่อมให้สม่ำเสมอ เครื่องเชื่อมที่ใช้ยี่ห้อ Panasonic รุ่น YD-

350RF2 สามารถปรับกระแสเชื่อมและแรงดันในการเชื่อมสูงสุดได้ที่ 350 A และ 36 V ตามลำดับ ลวดเชื่อมที่ใช้ชนิด ER70S-6 (Kobe Steel, Japan) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.2 mm มีอัตราการป้อนลวดเชื่อมที่ 5 m/min และใช้ก๊าซอาร์กอนผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 80% และ 20% ตามลำดับพ่นปกคลุมแนวเชื่อมที่แรงดัน 25 l/min

จากการศึกษาของ Biswas [5] และ Islam [7] พบว่ากระแสเชื่อม แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการเชื่อม และความเร็วในการเชื่อม เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญของกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW อีกทั้งลำดับและทิศทางในการเชื่อมยังส่งผลต่อการโค้งตัวของชิ้นงานอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาปัจจัยดังกล่าว และดำเนินการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ต่อขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานที่เกิดขึ้น โดยขนาดการโค้งตัวถูกวัดที่ตำแหน่ง X1 ถึง X2 ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับรูปที่ 2 แสดงวิธีการวัดขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานโดยใช้เวอร์เนีย-คาร์ลิปเปอร์ ขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานกรณีศึกษาที่ยอมรับได้ตามค่าพิคัดที่ลูกค้ากำหนดอยู่ในช่วง 73.4 ถึง 74.4 mm

เพื่อให้เกิดความสะดวกในการบันทึกและวิเคราะห์ขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ ขนาดการโค้งตัวจึงถูกบันทึกเทียบกับค่าพิคัดที่ลูกค้ากำหนดคือ 73.4 mm จากสภาวะในการเชื่อมปัจจุบันซึ่งใช้กระแสเชื่อมที่ 180 A แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ 20 V ความเร็วในการเชื่อม 40 cm/min และใช้ลำดับทิศทางในการเชื่อมจากจุด A ไปจุด B สำหรับแนวเชื่อมแรก และเชื่อมจากจุด C ไปจุด D สำหรับแนวเชื่อมที่สอง (รูปที่ 1 และรูปที่ 2) พบว่า ขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 74.89 mm หรือเกินจากค่าพิคัดที่ลูกค้ากำหนดคือ

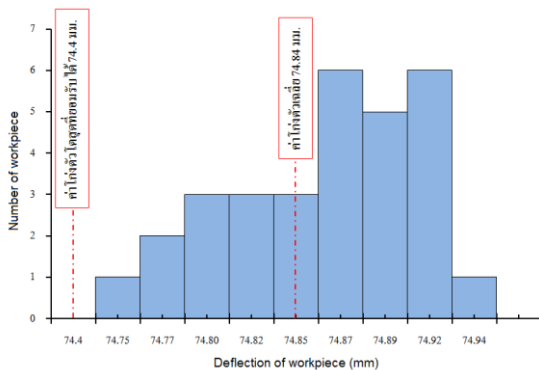
73.4 mm เท่ากับ 1.49 mm ซึ่งมากกว่าขนาดการโค้งตัวที่ยอมรับได้



รูปที่ 1 ที่ยึดหูแหวนรถยนต์และแนวการเชื่อมประกอบ



รูปที่ 2 ตำแหน่งของชิ้นงานที่ถูกวัดขนาดการโค้งตัว



รูปที่ 3 ขนาดการโค้งตัวชิ้นงานจากสภาวะการเชื่อมปัจจุบัน

จากรูปที่ 3 ขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานถูกรวบรวมจากแผนกเชื่อมประกอบ จำนวน 30 ชิ้น โดยขนาดการโค้งตัวถูกวัดที่ตำแหน่ง X1 ถึง X2 ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าการโค้งตัวของชิ้นงานที่วัดได้มีขนาดการโค้งตัวมากกว่าขนาดที่กำหนดทุกชิ้น โดยมีค่าเฉลี่ยของการโค้งตัวของชิ้นงานอยู่ที่ 74.84 มม หรือมีค่าเบี่ยงเบนจากค่า 74.3 มม เฉลี่ยเท่ากับ 1.44 มม

เพื่อแยกประเด็นในการวิเคราะห์กระบวนการเชื่อม อีกทั้งลดจำนวนการทดลองลงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม การศึกษาวิจัยจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อม และการวิเคราะห์ผลกระทบของลำดับและทิศทางในการเชื่อม ดังนั้นการดำเนินการทดลองจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยเช่นกัน

การทดลองในส่วนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของกระแสเชื่อม แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการเชื่อม และความเร็วในการเชื่อม ต่อขนาดการโค้งตัวของชิ้นงาน รวมไปถึงการหาค่าของปัจจัยในการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อลดขนาดการโค้งตัวของชิ้นงาน ปัจจัยในการทดลองแบ่งเป็น 2 ระดับ เพื่อให้จำนวนการทดลองทั้งหมดไม่มากจนส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการทดลองและกระบวนการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา ปัจจัยและระดับของค่าปัจจัยในการทดลองแสดงในตารางที่ 1 โดยขอบเขตของค่าปัจจัยในการเชื่อมที่ถูกนำมาทดลองในการศึกษานี้ครอบคลุมช่วงของการปรับตั้งค่าที่นิยมใช้ในสายผลิตอีกทั้งช่วงของค่าปัจจัยดังกล่าวยังถูกแนะนำโดยบริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมอีกด้วย [9] ลำดับการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 1 นี้ เริ่มจากทำการเชื่อมแนว AA โดยเริ่มจากจุด A ไปยัง B และเชื่อมแนว BB จากจุด C ไป D

ในการทดลองส่วนที่ 1 นี้มีการจัดลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มเพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อเป็นการลดความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error:  $\beta$ ) รวมการทดลองทั้งสิ้น 16 การทดลอง

**ตารางที่ 1** ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	ต่ำ	สูง
กระแสเชื่อม (A)	130 A	170 A
แรงเคลื่อนไฟฟ้า (B)	19 V	23 V
ความเร็วในการเชื่อม (C)	40 cm/min	50 cm/min

หมายเหตุ: สภาวะการเชื่อมเดิมคือ กระแสเชื่อม 180 A แรงเคลื่อนไฟฟ้า 20 V และความเร็วในการเชื่อม 40 cm/min

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการทดลองหาลำดับและทิศทางของการเชื่อมที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากลำดับและทิศทางการเชื่อมที่ให้ค่าการโค้งตัวของชิ้นงานน้อยสุด สภาวะในการเชื่อมที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนที่ 1 ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้ เนื่องจากชิ้นงานที่ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้มีแนวเชื่อมทั้งหมด 2 แนวและแต่ละแนวมีทิศทางการเดินเชื่อมที่เป็นไปได้ 2 ทิศทาง ดังนั้น ลำดับและทิศทางของการเชื่อมจึงมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 8 รูปแบบ โดยทั้ง 8 รูปแบบนี้ถูกนำมาทดลองเชื่อมซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละรูปแบบ ดังนั้นทดลองในส่วนที่ 2 จึงมีทั้งหมด 16 การทดลอง ปัจจัยที่พิจารณาในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	ต่ำ	สูง
ลำดับของการเชื่อมแนวแรก	AA	BB
ทิศทางการเชื่อมของแนวเชื่อม AA	A B	B A
ทิศทางการเชื่อมของแนวเชื่อม BB	C D	D C

### 3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลของสภาวะในกระบวนการเชื่อมต่อการโค้งตัว

เมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของผลการทดลองที่ได้ในเชิงสถิติ พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ มีอิสระต่อกัน และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ขนาดการโค้งตัวเมื่อเทียบกับค่าพิกัดที่ถูกค่ากำหนด) มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าการโค้งตัวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญภายใต้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% คือ กระแสเชื่อม กำลังไฟฟ้าในการเชื่อม และความเร็วในการเชื่อม เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย พบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม มีค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.04 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 นั้นแสดงว่าอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย มีผลต่อค่าการโค้งตัวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองยังพบว่ามีความน่าเชื่อถือที่ 95.7%

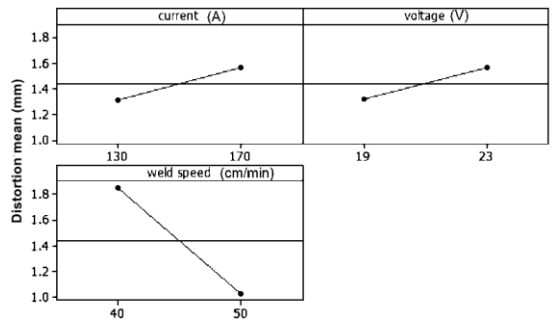
**ตารางที่ 3** ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปัจจัย	P-Value	Coef
Constant		1.440
Current (A)	0.000	0.126
Voltage (B)	0.000	0.125
Weld speed (C)	0.000	-0.410
Current*Weld speed (A*C)	0.040	-0.057

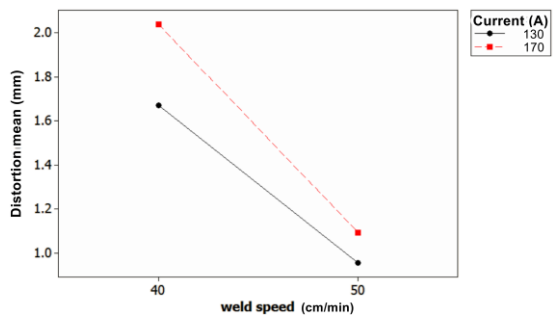
S = 0.098 R-Sq = 96.84% R-Sq(adj) = 95.7%

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยหลักที่ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้ต่อขนาดการโก่งตัวของชิ้นงาน จากรูปพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมจาก 130 A เป็น 170 A ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก 19 V ไปเป็น 23 V ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อมจาก 40 cm/min เป็น 50 cm/min พบว่าขนาดการโก่งตัวเฉลี่ยของชิ้นงานลดลง จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟและแรงเคลื่อนไฟฟ้าส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมทำให้ชิ้นงานได้รับผลกระทบทางความร้อนเพิ่มขึ้นและเกิดการโก่งตัวมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปรับลดความเร็วในการเชื่อมลง ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่สะสมในแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดความเค้นแรงดึงภายในชิ้นงานสูง เป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการโก่งตัวเพิ่มขึ้น

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นอันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม กล่าวคือ เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้สูงขึ้น และลดความเร็วในการเชื่อมลง ส่งผลให้ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น



**รูปที่ 4** ผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อขนาดโก่งตัวของชิ้นงาน



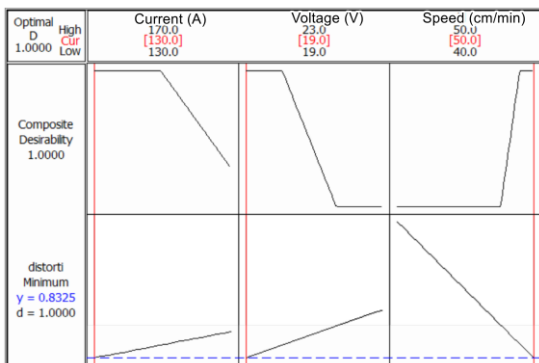
**รูปที่ 5** อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม

จากตารางที่ 3 สามารถเขียนสมการทำนายค่าการโก่งตัวของชิ้นงาน (Y) ในรูปของปัจจัย เพื่อใช้พยากรณ์ค่าการโก่งตัวชิ้นงานที่ลดลงเป็นไปตามที่ต้องการได้ดังสมการที่ 1

$$Y = 1.44 + 0.126A + 0.125B - 0.41C - 0.057A * C \quad (1)$$

โดยที่ A B และ C คือ กระแสเชื่อม (A) แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) และ ความเร็วในการเชื่อม (cm/min) ตามลำดับ

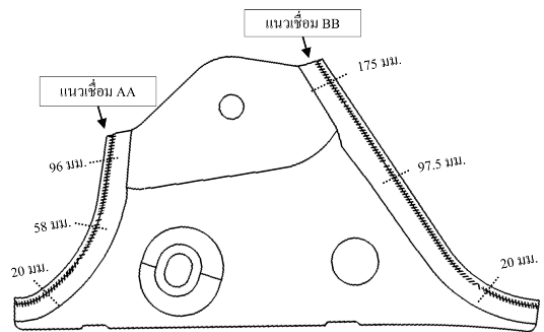
การหาสภาวะในการเชื่อมที่มีขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานน้อยที่สุดสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระแสเชื่อมที่ 130 A ค่าความต่างศักย์ในการเชื่อมที่ 19 V และ ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 cm/min ทำให้ได้ขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมประมาณ 0.83 mm ซึ่งมีขนาดการโค้งตัวน้อยกว่า 1 mm ตามค่าพิคคที่ลูกค้ากำหนดไว้เมื่อนำสภาวะการเชื่อมดังกล่าวมาทำการเชื่อมชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น พบว่าขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานโดยเฉลี่ยลดลงจาก 1.44 mm มาเป็น 0.83 mm (มีค่าต่ำสุด = 0.77 mm และค่าสูงสุด = 1.1 mm) ซึ่งเป็นไปตามผลการคำนวณจาก Response Optimizer



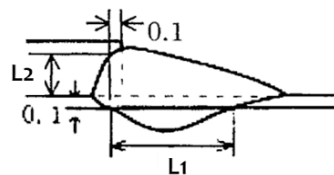
รูปที่ 6 ผลตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสม

หลังจากได้สภาวะในการเชื่อมที่ก่อให้เกิดการโค้งตัวที่ต่ำแล้ว เพื่อให้แน่ใจว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมนั้นไม่ทำให้ขนาดของแนวเชื่อมเปลี่ยนไปจนไม่ได้ตามค่าพิคคที่ลูกค้ากำหนด ขนาดและการซึมลึกของแนวเชื่อมบนชิ้นงานจึงถูกวัดและวิเคราะห์เพื่อยืนยันผลของการใช้สภาวะในการเชื่อมที่ได้

เพื่อทำการวัดขนาดของแนวเชื่อม ชิ้นงานถูกตัดออกเป็น 3 ช่วงในแต่ละแนวเชื่อม คือ ที่แนวเชื่อม AA ความยาว 116 mm มีระยะที่ตัดทดสอบคือ 20, 58 และ 96 mm ส่วนแนวเชื่อม BB ความยาว 195 mm มีระยะที่ตัดทดสอบคือ 20, 97.5 และ 175 mm ดังแสดงในรูปที่ 7 ระยะความกว้างของแนวเชื่อมที่ซึมลึกตามพิคคที่ต้องการควรมีระยะ L1 และ L2 ไม่น้อยกว่า 80% ของความหนาชิ้นงาน หรือไม่น้อยกว่า 2.88 mm ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 ระยะการตัดชิ้นงานเพื่อวัดขนาดแนวเชื่อม



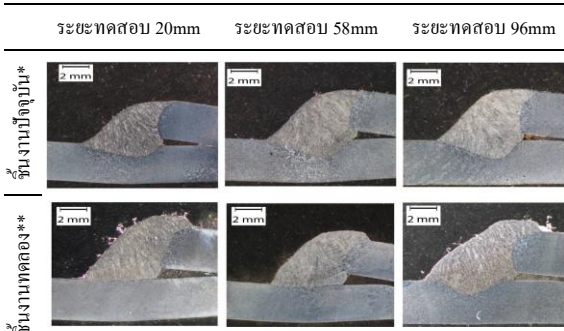
รูปที่ 8 การวัดค่าความกว้างของแนวเชื่อมที่ซึมลึก

ผลการตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบขนาดของแนวเชื่อมที่ซึมลึกนั้นได้แสดงในตารางที่ 4 และ 5 จากลักษณะของแนวเชื่อมที่ได้จากชิ้นงานเมื่อทำการเชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมปัจจุบันและสภาวะการเชื่อมใหม่พบว่า



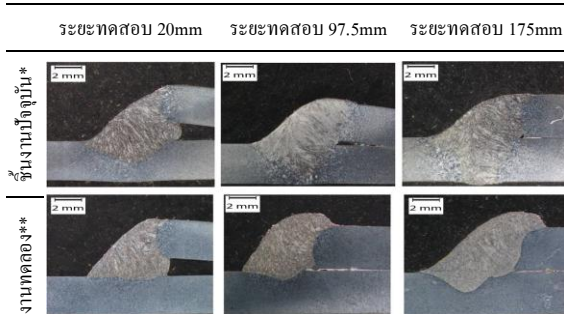
ลักษณะการหลอมและการซึมลึกของแนวเชื่อมมีขนาดที่ลดลงสำหรับสภาวะการเชื่อมใหม่ เนื่องมาจากค่าปัจจัยในการเชื่อมใหม่ส่งผลให้ชิ้นงานได้รับพลังงานความร้อนลดลง เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมลดลงทำให้ชิ้นงานได้รับผลกระทบทางความร้อนต่ำลงตามไปด้วย ส่งผลให้ขนาดการโค้งตัวของชิ้นงานลดต่ำลง สำหรับผลการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกถูกแสดงในรูปที่ 9 และ 10

**ตารางที่ 4** ผลการตัดชิ้นงานเพื่อวัดแนวเชื่อม AA

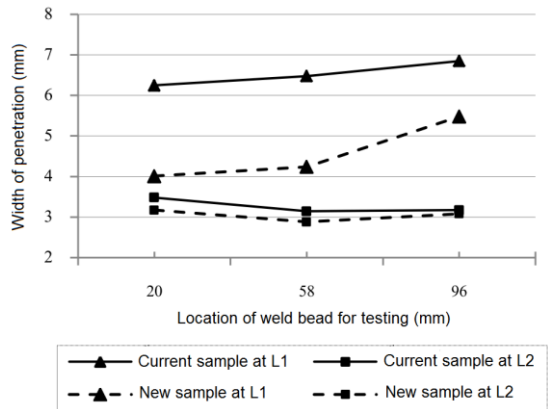


\* กระแสเชื่อม = 180 A แรงเคลื่อนไฟฟ้า = 20 V และ ความเร็วในการเชื่อม = 40 cm/min  
 \*\* กระแสเชื่อม = 130 A แรงเคลื่อนไฟฟ้า = 19 V และ ความเร็วในการเชื่อม = 50 cm/min

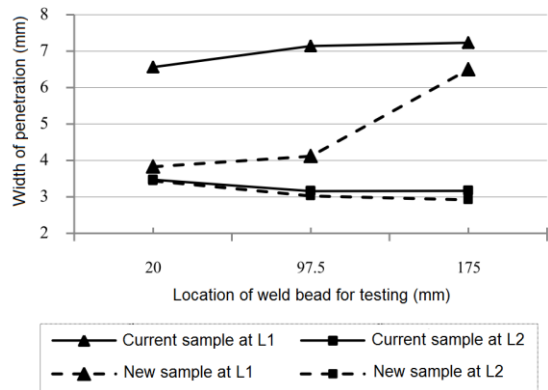
**ตารางที่ 5** ผลการตัดชิ้นงานเพื่อวัดแนวเชื่อม BB



\* กระแสเชื่อม = 180 A แรงเคลื่อนไฟฟ้า = 20 V และ ความเร็วในการเชื่อม = 40 cm/min  
 \*\* กระแสเชื่อม = 130 A แรงเคลื่อนไฟฟ้า = 19 V และ ความเร็วในการเชื่อม = 50 cm/min



**รูปที่ 9** ความกว้างของแนวเชื่อม AA



**รูปที่ 10** ความกว้างของแนวเชื่อม BB

จากรูปที่ 9 ที่ระยะ L1 พบว่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกของชิ้นงานปัจจุบัน มีค่าเท่ากับ 6.25, 6.85 และ 6.48 mm แต่ค่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกของชิ้นงานจากการทดลองเมื่อใช้สภาวะในการเชื่อมใหม่ มีค่าเท่ากับ 4.01, 4.24 และ 5.48 mm โดยมีค่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกลดลง 35.8, 34.6 และ 20 % ตามลำดับ สำหรับที่ระยะ L2 พบว่าค่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกของชิ้นงานปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 3.88, 3.14 และ 3.37 mm ในขณะที่ค่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกของชิ้นงานจากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 3.27, 2.88 และ 3.28 mm

โดยมีค่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกลดลง 6, 8.3 และ 2.8% ตามลำดับ สำหรับแนวเชื่อม BB (รูปที่ 10) พบว่าค่าความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกของชิ้นงานมีแนวโน้มใกล้เคียงกับแนวเชื่อม AA โดยความกว้างแนวเชื่อมระยะ L1 ปัจจุบัน มีค่าเท่ากับ 6.56, 7.23 และ 7.14 mm ในขณะที่ความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกของชิ้นงานที่ได้จากการใช้สภาวะในการเชื่อมใหม่ มีค่าเท่ากับ 3.83, 4.12 และ 6.50 mm สำหรับความกว้างแนวเชื่อมตำแหน่ง L2 มีความกว้างแนวเชื่อมที่ซึมลึกของชิ้นงานปัจจุบันเท่ากับ 3.47, 3.16 และ 3.17 mm แต่ความกว้างแนวเชื่อมที่ได้เมื่อใช้สภาวะในการเชื่อมใหม่คือ 3.44, 3.03 และ 2.92 mm จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ระดับพลังงานในการเชื่อมที่ต่ำลง ส่งผลให้ระยะซึมลึกของแนวเชื่อมลดลงทั้งระยะ L1 และ L2 อย่างไรก็ตาม ขนาดความกว้างแนวเชื่อมที่ลดลงนี้ยังมีค่าอยู่ในพิสัยที่ลูกค้ากำหนดคือมีค่ามากกว่า 2.88 mm นอกจากนี้ยังพบว่า ความกว้างของแนวเชื่อมระยะ L1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการเชื่อมเพิ่มมากขึ้น โดยมีสาเหตุจากพลังงานความร้อนที่ให้กับชิ้นงานในขณะที่ทำการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นตามระยะทางในการเชื่อม ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนสะสม ส่งผลต่อขนาดของบ่อหลอมละลายและความกว้างของแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้น สำหรับความสูงของแนวเชื่อมระยะ L2 พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะการเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปริมาณความร้อนที่สะสมในชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามระยะทางในการเชื่อม ส่งผลให้ขนาดบ่อหลอมของแนวเชื่อมกว้างขึ้น การละลายของเนื้อลวดเชื่อมสามารถถ่ายเทลงไปในแนวเชื่อมได้ในปริมาณที่มากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความสูงของแนวเชื่อมที่ได้มีขนาดที่ลดลงตามระยะทางในการเชื่อม

**3.2 ลำดับและทิศทางของการเชื่อมที่เหมาะสม**

จากผลการทดลองในส่วนที่ 1 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมชิ้นงานที่ยึดหูแหวนรถยนต์คือค่าของกระแสเชื่อม 130 A ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า 19 V และความเร็วในการเชื่อม 50 cm/min เมื่อนำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการทดลองส่วนที่ 2 เพื่อหาลำดับและทิศทางของการเชื่อมที่เหมาะสม ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยของลำดับการเชื่อมต่างๆ

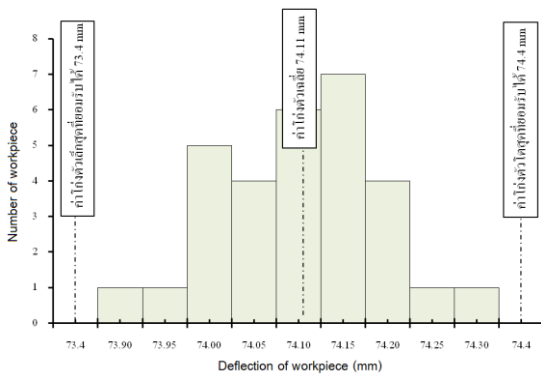
ทางเลือกในการเชื่อม	ลำดับการเชื่อม	ทิศทางเชื่อมแนวเชื่อมที่ 1	ทิศทางเชื่อมแนวเชื่อมที่ 2	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย (mm)
1	AA	AB	DC	1.25
2	AA	BA	CD	0.81
3	AA	AB	CD	0.90
4	AA	AB	DC	1.48
5	BB	DC	BA	0.91
6	BB	CD	BA	0.83
7	BB	CD	AB	0.84
8	BB	DC	AB	0.65

จากตารางที่ 6 สามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมโดยเลือกทางเลือกที่ 8 คือ เลือกเชื่อมแนวเชื่อม BB เป็นแนวแรก และใช้ทิศทางการเชื่อมแบบ D ไป C ส่วนแนวเชื่อม AA ใช้ทิศทางการเชื่อมแบบ A ไป B โดยลำดับและทิศทางของการเชื่อมดังกล่าวให้โค้งตัวของชิ้นงานน้อยสุด คือ มีขนาดการโค้งตัวเฉลี่ย 0.65 mm

ในขณะที่การเลือกทางเลือกที่ 4 คือ ใช้ลำดับและทิศทางของการเชื่อมที่แนวเชื่อม AA เป็นแนวแรก และใช้ทิศทางการเชื่อมแบบ A ไป B และจาก D ไป C

ที่แนวเชื่อม BB พบว่าให้ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานมากที่สุด คือ โก่งตัวเฉลี่ย 1.48 mm ซึ่งเกินพิคัดที่ยอมรับได้ จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าลำดับและทิศทางการเชื่อมส่งผลต่อการโก่งตัวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญและควรพิจารณาควบคู่ไปกับการปรับตั้งสภาวะในการเชื่อมเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีการซึมลึกตามเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนดและมีขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมที่ต่ำ

จากรูปที่ 11 เมื่อทำการเชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมแบบใหม่จำนวน 30 ชิ้นแล้ววัดขนาดการโก่งตัวพบว่าชิ้นงานทั้ง 30 ชิ้นมีขนาดการโก่งตัวเฉลี่ย 74.11 มม และมีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย 0.71 มม ซึ่งชิ้นงานทดสอบทั้งหมดมีขนาดการโก่งตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนด คือ ช่วงขนาด 73.4 ถึง 74.4 มม หรือมีค่าเบี่ยงเบนไม่เกิน 1 มม



รูปที่ 11 ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานจากสภาวะการเชื่อมใหม่

#### 4. สรุปผล

การโก่งตัวของชิ้นงานที่ยึดหูแหวนรถยนต์ภายหลังกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยทำการทดลองและวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ

ในการเชื่อม รวมไปถึงลำดับและทิศทางในการเชื่อมเพื่อลดขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานให้ต่ำที่สุด จากการวิจัยพบว่า การใช้กระแสเชื่อมเท่ากับ 130 A แรงเคลื่อนไฟฟ้า 19 V และ ความเร็วในการเชื่อม 50 cm/min ส่งผลให้ชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเกิดการโก่งตัวต่ำที่สุดคือ 0.83 mm เมื่อพิจารณาลำดับและทิศทางในการเชื่อมพบว่า การเชื่อมที่เริ่มเชื่อมจากแนวเชื่อม BB โดยเริ่มจากตำแหน่ง D ไป C และทำการเชื่อมแนว AA จากจุด A ไป B สามารถให้ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานน้อยสุดเฉลี่ย 0.65 mm ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในค่าพิคัดที่ลูกค้ากำหนด

#### 5. เอกสารอ้างอิง

[1] ASM International, “The ASM Handbook: Welding, Brazing and Soldering 6”, ASM International, 1993.

[2] V.V. Murugan and V. Gunaraj, “Effects of Process Parameters on Angular Distortion of Gas Metal Arc Welded Structural Steel Plates”, *Welding Journal*, 2005, pp. 165-171.

[3] W. Pattanapong, T. Yingsamphancharoen and N. Srisuwan, “Investigation of the Suitable Weld Current Range for ASTM A36 Carbon Steel through Semi-Automatic Flux-Cored Arc Welding”, *The Journal of Industrial Technology* 10(2), 2014, pp. 60-71.

[4] S. Kou, “Welding Metallurgy (2<sup>nd</sup> Eds.)”, John Wiley & Sons, 2002.

- [5] P. Biswas, D.A. Kumar, N.R. Mandal and M.M. Mahapatra, “A Study on the Effect of Welding Sequence in Fabrication of Large Stiffened Plate Panels”, Proceedings of the 12<sup>th</sup> OCEANS MTS Conference, Yeosu, Korea, 2011, pp. 429-436.
- [6] A. Pilipenko, “Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-Electrode Submerged Arc Welding”, Ph.D. Thesis, Department of Machine Design and Materials Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2001.
- [7] M. Islam, A. Buijk, M.R. Rohani and K. Motoyama, “Simulation-Based Numerical Optimization of Arc Welding Process for Reduced Distortion in Welded Structures”, Research Support US Department of Energy, Center for Advance Vehicular Systems, Mississippi State University, 2013, pp. 54-64.
- [8] G. Casalino, S.J. Hu and W. Hou, “Deformation Prediction and Quality Evaluation of the Gas Metal Arc Welding Butt Weld”, Journal of Engineering Manufacture 217(11), 2003, pp. 1615-1622.
- [9] Kobe Steel, “*The Essential Factors in Gas Metal Arc Welding* (4<sup>th</sup> Eds.)”, Kobe Steel Ltd., Tokyo, 2011.