การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเลเซอร์ชนิด Nd:YAG ที่มีต่อลักษณะของรอยเชื่อม

Study and Analysis of The Effect of Peak Power of Nd:YAG Laser on The Characteristic of Joint Welding

พิทยา วัฒนากูล[1]* วีรชัย อัศวเมธาพันธ์[2] และ วิทวัส ศตสุข[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
โทร 0-2564-3001-9 ต่อ 3041 โทรสาร 0-2564-3001-9 ต่อ 3049, อีเมล์ * pittaya_me8_tu@hotmail.com , switawats@engr.tu.ac.th

[2] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
โทร 0-2564-3001-9 ต่อ 3037 โทรสาร 0-2564-3001-9 ต่อ 3037 อีเมล์ aweerach@engr.tu.ac.th

Pittaya Wattanakul[1]*, Weerachai Asawamethapant[2], and Witawats Satasook[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Klong Luang, Pathumthani 12120,Thailand, Tel: 0-2564-3001-9 ext. 3041 Fax: 0-2564-3001-9 ext. 3049
E-mail * pittaya_me8_tu@hotmail.com , switawats@engr.tu.ac.th

[2] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Klong Luang,
Pathumthani 12120, Thailand, Tel: 0-2564-3001-9 ext. 3037 Fax: 0-2564-3001-9 ext. 3037, E-mail aweerach@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเลเซอร์ที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นและนำความสัมพันธ์นั้นมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขของการเชื่อมให้เหมาะสมสำหรับกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ลักษณะของรอยเชื่อมที่ทำการพิจารณา ได้แก่ ขนาดของรอยเชื่อมและความเป็นระเบียบของแนวการเชื่อม โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการศึกษา คือ นิโอดิเมียมแย็กเลเซอร์ ในโหมดพัลส์ ส่วนชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษามี 2 ส่วน ซึ่งเป็นโลหะประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 430 และ DHS_1 ซึ่งในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นชิ้นงานมีการเคลื่อนที่แต่ลำแสงเลเซอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ในกระบวนการเชื่อมนั้นทำในบรรยากาศของอาร์กอน ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้ในการคลุมผิวหน้าของชิ้นงานขณะที่ทำการเชื่อม ในการทดลองนี้ใช้ค่าพลังงานอยู่ที่ประมาณ 1.3 จูลต่อพัลส์เนื่องจากเป็นค่าพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมในกรณีนี้และจากการทดลองพบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงรอยเชื่อมจะมีขนาดใหญ่และมีความเป็นระเบียบมากกว่าในกรณีที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำกว่า ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้อยู่ที่ 1 กิโลวัตต์

Abstract

This research studies and analyzes the effect of peak power of laser on the characteristic of joint welding. The investigation of this relationship will be leaded to the optimum of laser welding condition. The characteristics of joint which are considered such as size and orderliness of bead profile occurred in welding process. This research is focused on using pulse Nd:YAG laser with two types of stainless steel; 430 and DHS_1. For this laser welding process, only work piece is set to be moved while laser focus beam is set to be stationary. And the process is operated under inert gas argon, which used to cover the work piece surface. In addition, the optimum pulse laser energy of 1.3 joules per pulse was used 1.3 in the process. The experimental results has shown that when we used higher peak power, we get the bigger welded size and better orderliness than when we used lower peak power. Here, the optimum peak power of this research is 1 kilowatt.

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคนิคการเชื่อมด้วยเลเซอร์ถือว่าเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีประสิทธิภาพที่สูงและสามารถประยุกต์ใช้กับชิ้นงานได้หลากหลายประเภท แต่เนื่องจากตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะของรอยเชื่อมมีอยู่หลายตัวแปรด้วยกัน เช่น พลังงาน กำลังไฟฟ้าสูงสุด เวลา ความเร็ว และคุณสมบัติของชิ้นงาน เป็นต้น [1,2] ดังนั้นในการเชื่อมด้วยด้วยเลเซอร์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับ ความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นกับลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดในหนึ่งพัลส์กับขนาดและความเป็นระเบียบของรอยเชื่อม โดยในทุกเงื่อนไขของการทดลองจะใช้ค่าพลังงานที่เท่ากันและมีค่าที่เหมาะสมซึ่งได้จากงานผลวิจัยก่อนหน้านี้ [3]

2. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การทดลองนี้ทำการศึกษาผลกระทบของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีต่อลักษณะของรอยเชื่อมซึ่งได้แก่ขนาดความกว้างและความลึกของรอยเชื่อมและความเป็นระเบียบของรอยเชื่อม โดยความเป็นระเบียบของรอยเชื่อมทำการพิจารณาจากระยะห่างของริ้วในแต่ละวงเชื่อม ซึ่งริ้วของรอยเชื่อมนั้นเกิดจากการเย็นตัวของโลหะที่หลอมละลาย ถ้าริ้วของรอยเชื่อมห่างเกินไปจะถือว่าไม่ผ่านการตรวจสอบ โดยแบ่งเงื่อนไขสำหรับการทดลองออกเป็น 5 เงื่อนไข โดยที่กำหนดให้แต่ละเงื่อนไขมีค่าพลังงานที่วัดได้จากผิวชิ้นงานอยู่ที่ 1.3 จูลต่อพัลส์ ซึ่งแต่ละเงื่อนไขมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดดังนี้ 1.00 0.81 0.72 0.65 และ 0.57 กิโลวัตต์ ตามลำดับ โดยมีอัตราการการเชื่อมอยู่ที่ 20 พัลส์ต่อวินาที ความเร็วในการหมุนของชิ้นงานอยู่ที่ 6 รอบต่อนาที และขณะทำการเชื่อมมีการปล่อยก๊าซอาร์กอนคลุมผิวชิ้นงานในอัตราที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ใช้ นิโอดิเมียมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG laser) ในโหมดพัลส์ในการเชื่อม ส่วนชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษามี 2 ส่วน ซึ่งเป็นโลหะประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 430 และ DHS_1 ซึ่งในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ ขณะที่ลำแสง เลเซอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้ในการคลุมผิวหน้าของชิ้นงานขณะที่ทำการเชื่อม และแสงเลเซอร์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ 0.6 มิลลิเมตร โดยที่เงื่อนไขสำหรับการทดลอง องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติของชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

พลังงาน	1.3 จูลต่อพัลส์
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	1.00, 0.81, 0.72, 0.6 และ 0.57 กิโลวัตต์
อัตราการเชื่อม	20 พัลส์ต่อวินาที
ความเร็วในการหมุน	6 รอบต่อนาที
ชนิดของเลเซอร์	เลเซอร์ชนิด Nd:Yag ในโหมดพัลส์
ชิ้นงาน	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 403 และ DHS_1
เส้นผ่าศูนย์กลางของเลเซอร์	0.6 มิลลิเมตร
ก๊าซเฉื่อย	อาร์กอน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ (wt%) [4]

Ferritic types	C	Mn	Si	Cr	P	S	Other
430	0.12	1.00	1.00	16-18	0.04	0.03	-
DHS_1	0.01	0.29	0.24	19.04	0.03	0.26	0.021Te

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบ [4]

คุณสมบัติ	ค่า
Density	7.8 g/cm^3
Thermal conductivity	26.5 W/m.K
Specific heat	460 J/kg.K
Latent heat	65 cal/g
Melting point	1,400 - 1,600 K
Boiling point	2,500 - 3,800 K

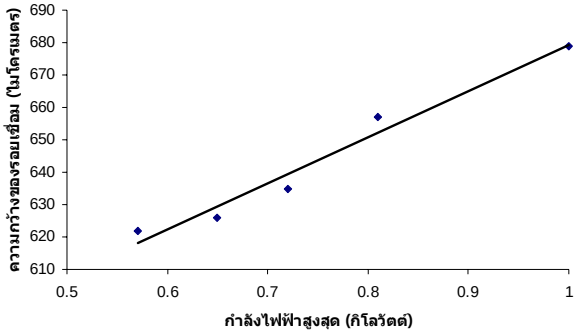
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลอง

จากการทดลองได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4 โดยที่ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับความกว้างและความลึกของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และภาพถ่ายความกว้างและความลึกของรอยเชื่อมแสดงดังรูป 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ตารางบันทึกผลการทดลอง

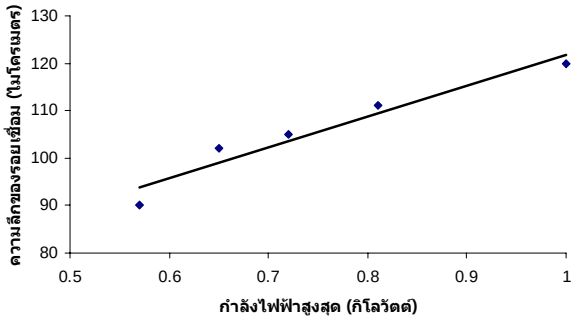
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)	ความลึก (ไมโครเมตร)	ความเป็นระเบียบ
0.57	622	90	ไม่ผ่าน
0.65	626	102	ไม่ผ่าน
0.72	635	105	ผ่าน
0.81	657	111	ผ่าน
1.00	679	120	ผ่าน



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับความกว้างของรอยเชื่อม

จากรูปที่ 1 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับความกว้างของรอยเชื่อม ดังนี้ P = 142.23W + 537.13

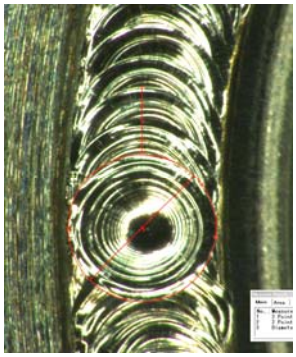
โดยที่ กำหนดให้ P คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ และ W คือ ความกว้างของรอยเชื่อมมีหน่วยเป็นไมโครเมตร



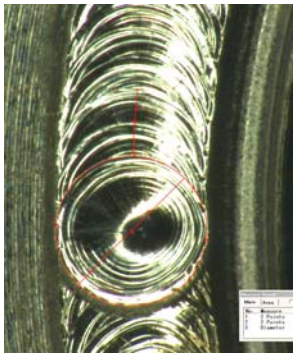
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับความลึกของรอยเชื่อม

จากรูปที่ 2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความกำลังไฟฟ้าสูงสุดและความลึกของรอยเชื่อม ดังนี้ P = 64.991D + 56.857

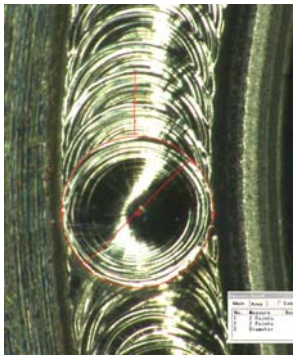
โดยที่ กำหนดให้ P คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ และ D คือ ความลึกของรอยเชื่อมมีหน่วยเป็นไมโครเมตร



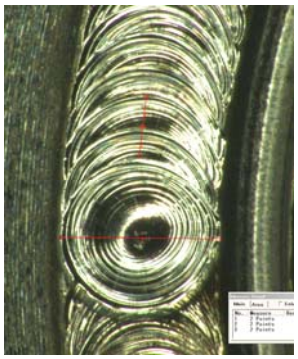
0.57 กิโลวัตต์



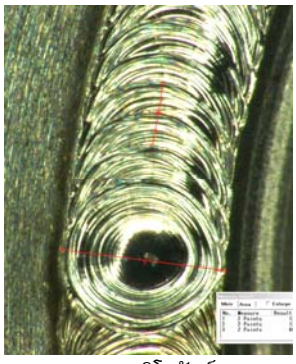
0.65 กิโลวัตต์



0.72 กิโลวัตต์

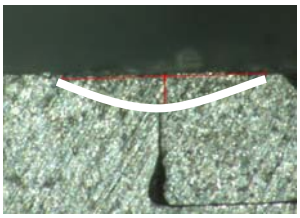


0.81 กิโลวัตต์

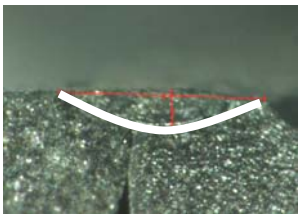


1.00 กิโลวัตต์

รูปที่ 3 ภาพถ่ายความกว้างของรอยเชื่อม (กำลังขยาย 175 เท่า)

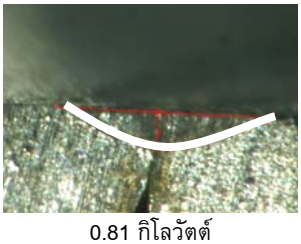


0.57 กิโลวัตต์

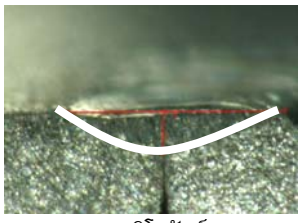


0.65 กิโลวัตต์

0.72 กิโลวัตต์



0.81 กิโลวัตต์



1.00 กิโลวัตต์

รูปที่ 4 ภาพถ่ายความลึกของรอยเชื่อม (กำลังขยาย 175 เท่า)

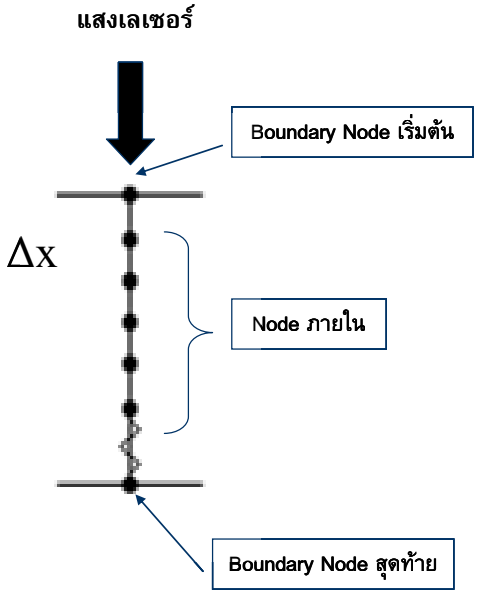
3.3 การวิเคราะห์

จากการทดลองในกรณีที่ค่าพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมเหมาะสมจะเห็นว่าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่าสูงกว่าจะมีรอยเชื่อมที่มีขนาดความกว้างและความลึกที่มากกว่า นอกจากนี้ยังมีความเป็นระเบียบมากกว่า คือมีความถี่ของริ้วภายในวงเชื่อมมากกว่า สาเหตุเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนที่แสงเลเซอร์ส่งไปยังผิวชิ้นงานซึ่งส่งผลทั้งในเรื่องของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมและการลดลงของอุณหภูมิขณะที่รอยเชื่อมเย็นตัวลง คือ เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยจึงทำให้ขนาดความกว้างและความลึกของรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น ในกรณีที่รอยเชื่อมมีความไม่เป็นระเบียบหรือริ้วภายในวงเชื่อมมีความห่างนั้นคาดว่าเกิดจากการที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยเกินไปจึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนขณะที่มีการเย็นตัวของ

ชิ้นงานที่หลอมเหลวบริเวณรอยเชื่อมต่ำเกินไป จึงส่งผลให้ริ้วของรอยเชื่อมมีความห่างกันเกิดขึ้น

4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

วัตถุประสงค์ของการทำแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการลดต้นทุนในส่วนของชิ้นงานที่จำเป็นต้องนำมาทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม แต่เนื่องจากโดยทั่วไปแบบจำลองการจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นถือว่าเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยาก ดังนั้นในเบื้องต้นการวิจัยนี้จึงทำโปรแกรมอย่างง่ายเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อหาค่าของพลังงาน กำลังไฟฟ้าสูงสุด และค่าความลึกที่เกิดขึ้น โดยโปรแกรมที่นำมาใช้คือ finite different และกำหนดให้เป็นการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติตามแนวความลึกของแนวการเชื่อม ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆดังรูปที่ 5

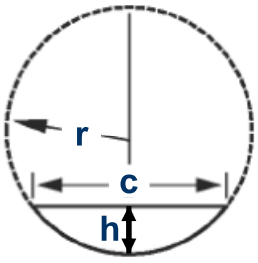


รูปที่ 5 รูปแบบเงื่อนไขสำหรับการพิจารณากรถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ ของการเชื่อมด้วยเลเซอร์

ในการวิเคราะห์นั้นมีปัญหาอยู่ที่ว่าเราไม่ทราบค่าพลังงานที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวชิ้นงาน เนื่องจากในการเชื่อมจะมีการดูดซับพลังงานจากแสงเลเซอร์เพียงบางส่วนเท่านั้นส่วนที่เหลือจะเกิดการสะท้อนออกไป ดังนั้นพลังงานที่ผิวชิ้นงานได้รับจึงมีค่าไม่ถึง 1.3 จูลต่อพัลส์แน่นอน จึงจำเป็นต้องหาค่าพลังงานที่แท้จริงที่ผิวชิ้นงานได้รับซึ่งสามารถหาได้จาก 3 วิธีด้วยกัน คือ

วิธีที่ 1 ใช้ค่าการดูดซับพลังงานความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมในการหาค่าพลังงาน โดยค่าที่ใช้ในการคำนวณของเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ที่ 0.31 เปอร์เซ็นต์ [5] ซึ่งค่าพลังงานพลังงานที่เกิดขึ้นในกรณีนี้มีค่า 0.403 จูลต่อพัลส์

วิธีที่ 2 ใช้ค่าพลังงานจากค่าความร้อนแฝงและความร้อนจำเพาะในการคำนวณ ซึ่งก่อนอื่นจำเป็นต้องหาปริมาตรของรอยเชื่อมในหนึ่งพัลส์ก่อนซึ่งสามารถคำนวณได้จากรูปเสี้ยวทรงกลมดังรูปที่ 6



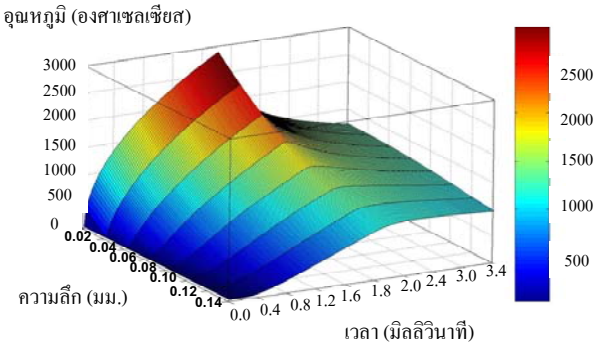
$$V = 3.1416 * h * \left(\frac{c^2}{8} + \frac{h^2}{6} \right)$$

รูปที่ 6 สูตรการคำนวณปริมาตรของเสี้ยววงกลม [6]

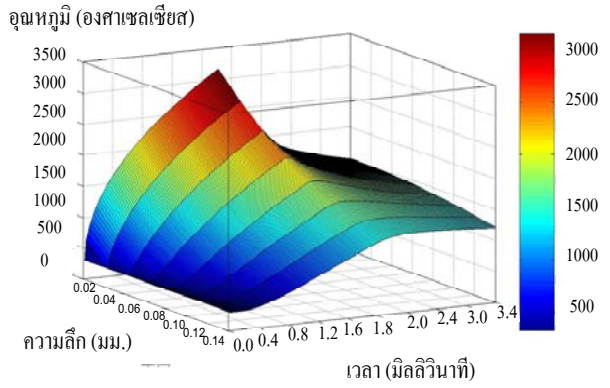
โดยที่ h คือ ความลึกของรอยเชื่อม และ c คือความกว้างของรอยเชื่อม ซึ่งค่าพลังงานพลังงานที่เกิดขึ้นในกรณีนี้มีค่า 0.189 จูลต่อพัลส์

เมื่อนำค่าพลังงานของทั้ง 2 กรณีไปแทนยังโปรแกรม finite different พบว่าในกรณีที่ 1 มีค่าของอุณหภูมิมีค่าเกินกว่า 4,000 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่ามีค่าสูงเกินไปเนื่องจากจะทำให้ชิ้นงานมีการระเหยเกิดขึ้น และในกรณีที่ 2 มีค่าของอุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงานถือว่าน้อยมีค่าเกินไปเนื่องจากไม่เกิดการหลอมเหลวขึ้น ดังนั้น วิธีที่ 3 จึงจำเป็นต้องหาค่าพลังงานที่เหมาะสมโดยการแทนค่าพลังงานต่าง ๆลงในโปรแกรม finite different ซึ่งค่าพลังงานที่เหมาะสมนี้อยู่ที่ประมาณ 0.322 จูลต่อพัลส์ โดยถ้าคิดเป็นค่าการดูดซับพลังงานของเหล็กกล้าไร้สนิมจะอยู่ที่ประมาณ 24.77 เปอร์เซ็นต์

สำหรับแบบจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นใน 1 มิติตามแนวความลึกของรอยเชื่อมจะมีการกำหนดให้ในพัลส์ที่ 1 ของการเชื่อมมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และพัลส์ที่ 2 มีอุณหภูมิเริ่มต้นเป็นค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังการเย็นตัวหลังจากการเชื่อมพัลส์ที่ 1 ไปแล้ว 50 มิลลิวินาที สาเหตุที่ต้องพิจารณา 2 จุด เนื่องจากในการเชื่อมด้วยเลเซอร์จำเป็นต้องมีการซ้อนทับกันของแต่ละวงเชื่อมประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป



รูปที่ 7 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในวงเชื่อมที่ 1



รูปที่ 8 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในวงเชื่อมที่ 2

ในรูปที่ 7 และ 8 เป็นตัวอย่างแบบจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นใน 1 มิติ ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.72 กิโลวัตต์ ซึ่งในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นวงเชื่อมที่ 1 จะมีจุดที่ชิ้นงานสามารถหลอมเหลวได้ลึกที่สุดคือมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงานที่ประมาณ 1,500 เซลเซียสอยู่ที่ประมาณ 0.08 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง แต่ในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นวงเชื่อมที่ 2 จุดที่สามารถหลอมเหลวได้อยู่ที่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งค่าความลึกจากการทดลองและจากแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงตรงกับผลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 5 ค่าความลึกที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์)	ความลึกจากการทดลอง (ไมโครเมตร)	ความลึกจากแบบจำลอง (ไมโครเมตร)
0.57	90	100
0.65	102	100
0.72	105	100
0.81	111	110
1.00	120	120

ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนนี้ทำให้ทราบค่าการดูดซับพลังงานของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งนำไปใช้ในการหาค่าพลังงานที่เหมาะสมในการเชื่อม และยังทำนายค่าความลึกที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่างๆกันได้อีกด้วย แต่ในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นแบบจำลองนี้บอกได้เพียงว่าที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่าใดรอยเชื่อมถึงจะมีการหลอมเหลวได้ แต่ยังไม่สามารถบอกค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เหมาะสมได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาและพัฒนาในรายละเอียดต่อไป

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าในการเชื่อมด้วยเลเซอร์นอกจากจะต้องทำการเชื่อมในช่วงของพลังงานที่เหมาะสมแล้วยังต้องทำการเชื่อมที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเหมาะสมอีกด้วย เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้จะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งมีผลต่อขนาดความกว้างและความลึกของรอยเชื่อม และความเป็นระเบียบของรอยเชื่อม ซึ่งค่าที่เหมาะสมนี้ควรมีค่าตั้งแต่ 0.72 กิโลวัตต์ขึ้นไป และจากการทดลองพบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่และมีความเป็นระเบียบมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสำหรับการทดลองนี้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความเป็นระเบียบที่สุดอยู่ที่สุดอยู่ที่ 1 กิโลวัตต์ และในส่วนของแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้โดยสามารถใช้ในการหาค่าพลังงานที่เหมาะสม และทำนายความลึกของรอยเชื่อมที่กำลังสูงสุดต่างๆกันได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท NIDEC HI-TECH MOTOR (THAILAND) CO., LTD. ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านอุปกรณ์ สถานที่ และทุนในการวิจัยนี้ รวมทั้งขอขอบคุณ นางสาวจุฑามาศ โทปุรินทร์ และ นายธนากิจ กายพรมราช สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] W. W. Duley Uniwersity of waterloo , “Laser Welding,” JOHN WILEY & SONS , INC. , 1998 .

[2] Unitek Miyachi Corporation. http://www.miyachiunitek.com (accessed on Dec 2006).

[3] พิทยา วัฒนากูล , วีรชัย อัศวเมธาพันธ์ และ วิทวัส ศตสุข 'การศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์' การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่ง ประเทศไทยครั้งที่ 20

[4] Wrought Stainless Steels. ASM HANDBOOK Volume1.

[5] J. Wilson , J. F. B. Hawkes , รศ.สุรพล รักวิจัย เรียบเรียง , “เลเซอร์ ทฤษฎีและการประยุกต์,” เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า , 2544

[6] http://www.engineersedge.com/volume_calc/spherical_segment.htm (accessed on Jan 2007).