

การศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร
ที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์
Study and Analysis of the relationship between
laser welding parameters and characteristic of joint welding

พิทยา วัฒนากุล^{1*} วีรชัย อัสวเมธาพันธ์² และ วิทวัส ศตสุข¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
โทร 0-2564-3001-9 ต่อ 3041 โทรสาร 0-2564-3001-9 ต่อ 3049, อีเมล * 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 อีเมล aweerach@engr.tu.ac.th

Pittaya Wattanakul^{1*}, Weerachai Asawamethapant², and Witawats Satasook¹

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 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมกับลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ เพื่อนำความสัมพันธ์นั้นมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ลักษณะของรอยเชื่อมที่ทำการพิจารณา ได้แก่ ความเป็นระเบียบของแนวการเชื่อม และจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม โดยที่แสงเลเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ นีโอติเมียมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG laser) ในโหมดพัลส์ ส่วนชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษามี 2 ส่วน ซึ่งเป็นโลหะประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 430 และ DHS_1 ซึ่งในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้น ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ขณะที่ลำแสงเลเซอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ในกระบวนการเชื่อมยังทำในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้ในการคลุมผิวหน้าของชิ้นงานขณะที่ทำการเชื่อม จากการทดลองพบว่าพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะของรอยเชื่อม โดย การเชื่อมที่ค่าพลังงานอยู่ในช่วง 3.1-3.8 จูลต่อพัลส์ รอยเชื่อมไม่เป็นระเบียบ และมีจุดบกพร่องเกิดขึ้น ได้แก่ การเกิดหลุมบริเวณรอยเชื่อม ในขณะที่การเชื่อมที่ค่าพลังงานอยู่ในช่วง 3.8-4.7 จูลต่อพัลส์ รอยเชื่อมเป็นระเบียบ และไม่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม

Abstract

This research is to study and analyze the effect of energy of laser on the characteristic of joint of laser welding. The investigation of this relationship will be led to the optimum of laser welding condition. The characteristics of joint which are considered such as orderliness of bead profile and defect 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. The experimental results has shown that the energy of laser beam between 3.1-3.8 joules/pulse will give defected of joint of laser welding while the energy between 3.8-4.7 joules/pulse will give a good condition of joint of laser welding.

Keywords: defect of welding / Nd:YAG laser / laser welding process

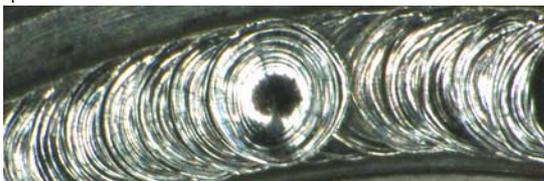
1. บทนำ

ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทยใช้เทคนิคเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งถือว่าเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสูงมาก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือสูง ใช้งานได้ง่ายและสามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภท ถึงแม้ว่าจะมีราคาต้นทุนที่สูงแต่เมื่อเทียบกับข้อดีแล้วถือว่าคุ้มค่าในการลงทุน

ในประเทศไทย ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นยังมีอยู่น้อยมาก โดยส่วนใหญ่นำเครื่องเลเซอร์มาใช้ในการเชื่อม โดยไม่รู้ถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่ต้องคำนึงถึงในการเชื่อม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมไม่สูงเพียงพอต่อความต้องการของผู้ผลิต โดยทั่วไปปัญหาที่พบเกิดจากการที่รอยเชื่อมมีจุดบกพร่องต่างๆเกิดขึ้น ได้แก่ การเกิดรอยร้าว รูรั่ว และ pinhole (ความไม่ต่อเนื่องบนรอยเชื่อม ลักษณะเป็นหลุมสีดำ) ดังนั้นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจุบันได้มีการทำการวิจัยเพื่อลดจุดบกพร่องที่เกิดจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์ เช่น การลดรูพรุน (porosity) ในรอยเชื่อม โดยใช้วิธีการเตรียมผิวหน้าของวัสดุ (surface preparation) และวิธีการยิงแสงเลเซอร์แบบ 2 จุด (dual spot) [4] เป็นต้น ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานของเลเซอร์ที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อม เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของพลังงานที่เหมาะสมในการเชื่อม ซึ่งการพิจารณาลักษณะของรอยเชื่อมดังในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ความเป็นระเบียบของรอยเชื่อม หมายถึง การเรียงตัว ความสม่ำเสมอและความเรียบของแนวรอยเชื่อม
2. จุดบกพร่องต่างๆที่เกิดบริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ 1 ลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์

สำหรับการวิจัยนี้ใช้ นิโอดิเมียมแยกเลเซอร์ (Nd:YAG laser) ในโหมดพัลส์ในการเชื่อม ส่วนชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษามี 2 ส่วน ซึ่งเป็นโลหะประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 430 และ DHS_1 ซึ่งในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ ขณะที่ลำแสงเลเซอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้ในการคลุมผิวหน้าของชิ้นงานขณะทำการเชื่อม ขนาดความกว้างของรอยเชื่อมประมาณ 0.65 มิลลิเมตร

2. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยเลเซอร์

2.1 กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์

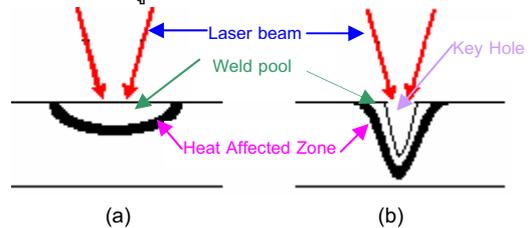
การเชื่อมด้วยเลเซอร์ คือ การนำโลหะ (ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้) ตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไปมาทำการเชื่อม โดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีแสงเลเซอร์ซึ่งทำให้บริเวณรอยต่อของโลหะเกิดเรียกว่า Melt Pool หรือ Weld Pool และเมื่อ Melt Pool เย็นตัวลงจะเกิดรอยเชื่อมขึ้น ซึ่ง

การเชื่อมด้วยเลเซอร์จะต้องมีการควบคุมความร้อน และการเย็นตัวของ Melt Pool ให้สมดุลด้วย เพื่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม [1] , [2]

หลักการเชื่อมด้วยเลเซอร์มี 2 หลักการ คือ

1. Conduction Welding
2. Keyhole หรือ Penetration Welding

ซึ่งแบบ Conduction Welding นั้นผิวหน้าของชิ้นงานบริเวณ Melt Pool ยังเป็นระนาบเดียวกันอยู่ยังไม่ถูกเจาะลึกลงไป ส่วนแบบ Keyhole Welding นั้นผิวหน้าของชิ้นงานบริเวณ Melt Pool จะถูกเจาะลึกลงไป เมื่อลำแสงเลเซอร์กำลังสูงตกกระทบผิววัสดุจะปรากฏว่า จะมีวัสดุบางส่วนที่เกิดการระเหยเป็นไอ ทำให้เกิดหลุมเล็กๆซึ่งเรียกว่า คีย์โฮล (Keyhole) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูป (a) : Conduction Welding ,
รูป (b) : Penetration Welding [3]

2.2 การเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์

การเชื่อมด้วยเลเซอร์จะสามารถใช้ได้ดีในการเชื่อมโลหะ และรอยเชื่อมมีคุณภาพสูง ซึ่งรอยเชื่อมที่มีคุณภาพสูงนั้นขึ้นกับ

1. การออกแบบและการเตรียมรอยเชื่อม
2. ส่วนประกอบและการไหลของแก๊สเฉื่อยที่ใช้
3. อุณหภูมิ หรือ Preheating (สำหรับบางกรณีที่สำคัญ)
4. ชนิดของ Filler และความเร็วในการป้อน
5. การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของ Alloy
6. ผลกระทบทางความร้อนบริเวณ Heat-Affected Zone

2.3 ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม

ในตารางที่ 1 บอกถึง ตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการเชื่อม [3]

Laser power
Amplitude, CW or pulsed wave
Pulse shape and repetition rate
Focusing
Location of focal spot on workpiece
Intensity distribution within spot on surface
Shield gas
Type, Flow rate, Orientation relative to focus, Trailing, coaxial, leading, Reverse side, Nozzle flow pattern

ตัวแปรเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขของการเชื่อม ในหลายๆกรณีจะมีการตัดรอยเชื่อมเพื่อตรวจสอบดูรอยเชื่อมและรูปร่างของรอยเชื่อมเพื่อศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง Metallurgical และ

Microstructure ซึ่งการตรวจสอบเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของเงื่อนไขที่จะใช้ในการเชื่อมที่สามารถยอมรับได้

2.4 ก๊าซเฉื่อย

หน้าที่แรกของก๊าซเฉื่อย คือ ป้องกันการเกิด Oxidation ในการเชื่อมและป้องกันการเกิดเขม่าบริเวณรอบๆ Fusion Zone หน้าที่อย่างที่สอง คือ ยับยั้งการเกิดพลาสมาของไอระเหยเหนือบริเวณ Weld Zone และช่วยเป่า Plasma ออกไป หน้าที่สุดท้ายคือ ช่วยเพิ่มคุณภาพของรอยเชื่อม ก๊าซเฉื่อยที่นิยมใช้ในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ได้แก่

He มีความสามารถในการ Ionization ได้สูงและต้านทานการ Break Down

N₂ มักใช้แทน He เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแต่ราคาถูกกว่า อัตราการไหลทั่วไปอยู่ที่ 10 – 40 l/min แต่ถ้าความเร็วในการเชื่อมสูงกว่า 10 m/min จะต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สมากกว่านี้

Ar ป้องกันการเกิด Oxidation ได้ดี

2.5 รูปแบบการถ่ายเทความร้อน

การเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้น เป็นกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นตั้งแต่แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ เนื่องจากตัวแปร ความไม่แน่นอนของพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ออกมา, อิทธิพลของพลาสมา และ ความสมดุลของการเคลื่อนที่ของของไหลขณะทำการเชื่อม ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อค่าพลังงานที่ส่งไปยังชิ้นงาน ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติและลักษณะของรอยเชื่อม

ความซับซ้อนจากกระบวนการเชื่อม และการที่โลหะที่มีสถานะเป็นของแข็งกลายเป็นของเหลวหลังจากที่มีแสงเลเซอร์ตกกระทบ ทำให้การออกแบบวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ยังไม่แม่นยำพอ เช่น ในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นระหว่างทำการเชื่อมนั้นจะใช้การประมาณมาใช้ในการคำนวณ

ซึ่งในความเป็นจริง ค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณควรเป็นค่าของข้อมูลการทดลองที่แน่นอนทั้งจากคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของโลหะ ภายใต้เงื่อนไขที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อม ซึ่งจะได้ค่าที่แท้จริงในการคำนวณและยังสามารถบ่งชี้แนวโน้มของตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมอีกด้วย

รูปแบบการเชื่อมแบบ penetration welding จะมีการระเหยที่ผิวของ weld pool ซึ่งในการหาสมการทางความร้อนนั้นจะใช้ $T(0,t) = T_v$ (อุณหภูมิของการกลายเป็นไอ)

$$T_v - T_0 = \frac{A_v I(0)}{K_v (2\pi)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{8k_v t}{w} \right] \quad (1)$$

K คือ ค่า thermal conductivity , k คือ ค่า thermal diffusivity

w คือ Gaussian beam radius , T₀ คือ อุณหภูมิบรรยากาศ

t คือ เวลา , A คือ ค่า absorptivity [3]

3. ขั้นตอนการทดลอง

3.1 การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆในการเชื่อม

ในการทดลองนี้ เราได้ทำการศึกษาตัวแปรในส่วนของพลังงานที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งพัลส์ว่ามีอิทธิพลที่ส่งผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมอย่างไรสาเหตุที่เลือกทำการศึกษาค่าตัวแปรนี้เนื่องจากในขั้นตอนการปฏิบัติงาน

เชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์จริงในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการกำหนดค่าพลังงานที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งพัลส์ให้มีค่าคงที่อยู่ที่ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ทำให้รอยเชื่อมของโลหะมีความเป็นระเบียบและไม่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในรอยเชื่อม สำหรับงานวิจัยนี้ค่าพลังงานคงที่ที่สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมประมาณ 4.2 จูลต่อพัลส์ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการเชื่อมมีดังตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในการวิจัยนี้

Pulse Time (msec)
Voltage Setting (Volt)
Pulses Per Second (Hz)
Number of Shots
Rotary Speed (deg/sec)
Tack Locations
Tack Speed (deg/sec)
Spot Overlap %
Weld Length + Overlap (deg.)
Weld Speed (in/sec)

โดยในการทดลองนี้การเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมทำได้โดยการเปลี่ยนค่า pulse time และ voltage

3.2 การทดลอง

การทดลองของงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งมีจุดประสงค์ คือ

- การทดลองตอนที่ 1 ทำการทดลองเพื่อหาค่าช่วงพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน และหาความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้นกับลักษณะของรอยเชื่อม
- การทดลองตอนที่ 2 ทำการทดลองเพื่อยืนยันค่าพลังงานที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม คือ 4.2 จูลต่อพัลส์ ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1

1. แบ่งการทดลองออกเป็น 9 เงื่อนไข โดยการปรับค่า Voltage เป็น 3 ค่า และปรับค่า pulse time อีก 3 ค่า ดังนี้

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลองตอนที่ 1

condition	voltage (v)	pulse time (msec)
1-1	225	1.6
1-2		1.7
1-3		1.8
2-1	235	1.6
2-2		1.7
2-3		1.8
3-1	245	1.6
3-2*		1.7
3-3		1.8

*(Condition 3-2 เป็น เงื่อนไขที่ใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม)

AMM064

2. ทำการเชื่อมโลหะประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 และ DHS_1 ตามเงื่อนไขที่กำหนด และบันทึกค่าพลังงานที่เกิดขึ้น
3. ตรวจสอบลักษณะของรอยเชื่อม โดย
 - กล้องกำลังขยายขนาด 50 เท่า เพื่อตรวจสอบดูแนวการเชื่อม การเรียงตัวของรอยเชื่อม และ pin hole
 - กล้องกำลังขยายขนาด 175 เท่า เพื่อตรวจสอบดูรอยเชื่อมที่จุดสุดท้าย
 - ทดสอบด้วยเครื่อง He-leak เพื่อตรวจสอบดูว่าชิ้นงานมีรูรั่วหรือไม่

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2

1. แบ่งการทดลองออกเป็น 5 เงื่อนไข โดยการปรับค่า Voltage เป็น 5 ค่า และกำหนดให้ค่า pulse time มีค่าเท่ากับ 1.7 msec ดังนี้ ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทดลองตอนที่ 2

condition	voltage (V)	pulse time (msec)
A	241	1.7
B	243	
C	245	
D	247	
E	249	

2. ทำการเชื่อมโลหะประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 และ DHS_1 ตามเงื่อนไขที่กำหนดและบันทึกค่าพลังงานที่เกิดขึ้น
3. ตรวจสอบลักษณะของรอยเชื่อม โดย
 - กล้องขยายขนาด 100 เท่า เพื่อตรวจสอบดูแนวการเชื่อม การเรียงตัวของรอยเชื่อม และ pin hole
 - ทดสอบด้วยเครื่อง He-leak เพื่อตรวจสอบดูว่าชิ้นงานมีรูรั่วหรือไม่

3.3 ผลการทดลอง

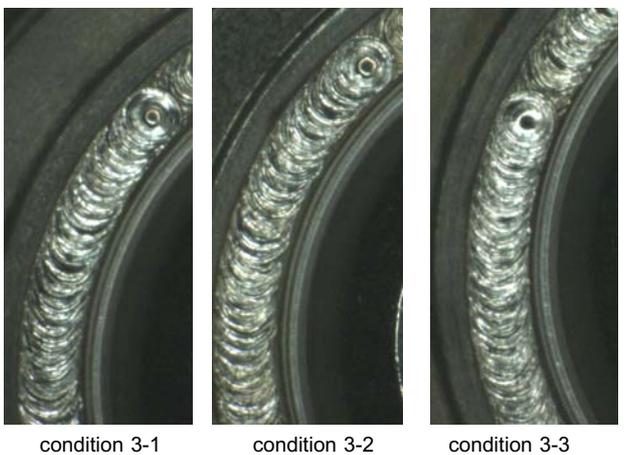
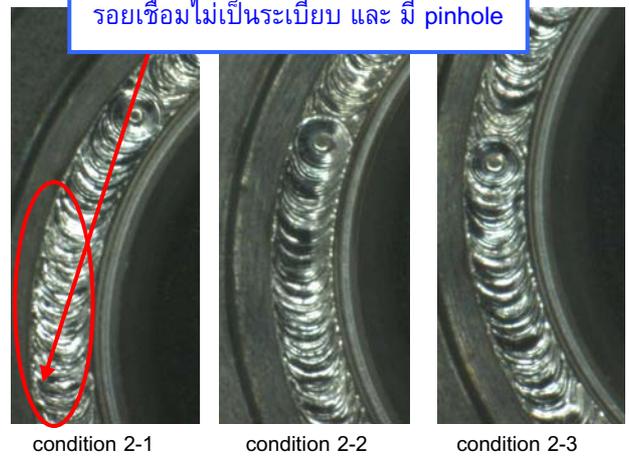
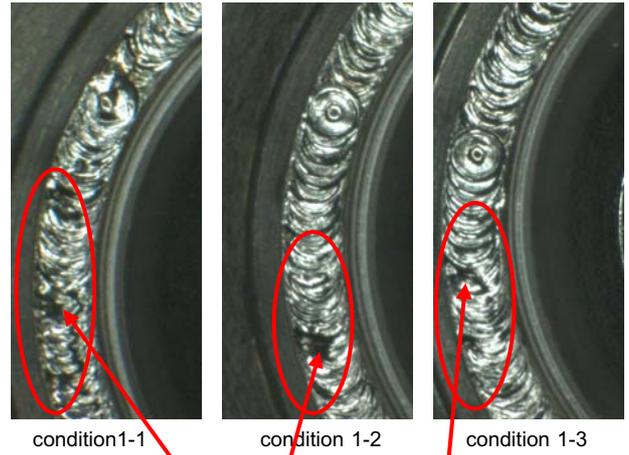
3.3.1 ผลการทดลองตอนที่ 1

ตารางที่ 5 ตารางบันทึกผลการทดลองตอนที่ 1

condition	pulse energy (J/p)	การตรวจสอบ		
		ความเป็นระเบียบ	pin hole	He-leak
1-1	3.1-3.3	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน
1-2	3.5-3.7	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน
1-3	3.7-4.0	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน
2-1	3.5-3.8	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน
2-2	3.8-4.1	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
2-3	4.1-4.3	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
3-1	3.9-4.2	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
3-2	4.1-4.4	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
3-3	4.4-4.7	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

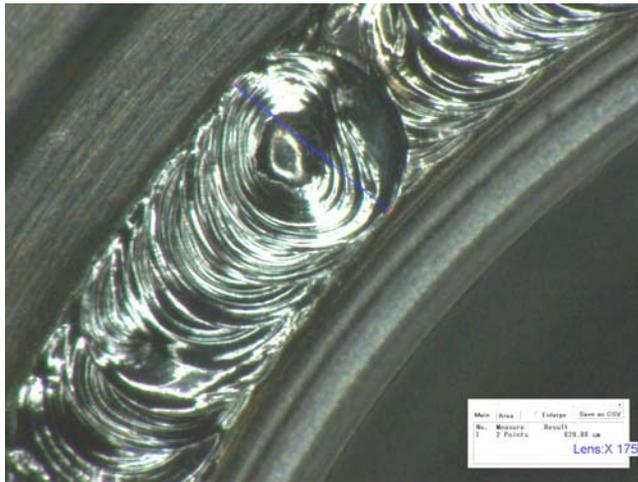
ตารางที่ 5 แสดงผลการตรวจสอบจากการเชื่อมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ตามตารางเงื่อนไขการทดลองตอนที่ 1 รวมทั้งค่าพลังงานที่เกิดขึ้นขณะ

ทำการเชื่อม ส่วนในรูปที่ 3 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะเห็นว่าเงื่อนไขที่ 1-1, 1-2, 1-3 และ 2-1 รอยเชื่อมไม่เป็นระเบียบและมี pinhole เกิดขึ้น ส่วนเงื่อนไขที่เหลือ รอยเชื่อมมีความเป็นระเบียบและไม่มี pinhole เกิดขึ้น และจากการตรวจสอบ He-leak ทุกกรณีไม่มีการรั่วเกิดขึ้น โดยที่วัสดุทางด้านซ้ายของรอยเชื่อมทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด DHS_1 ส่วนวัสดุทางด้านขวาของรอยเชื่อมทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430

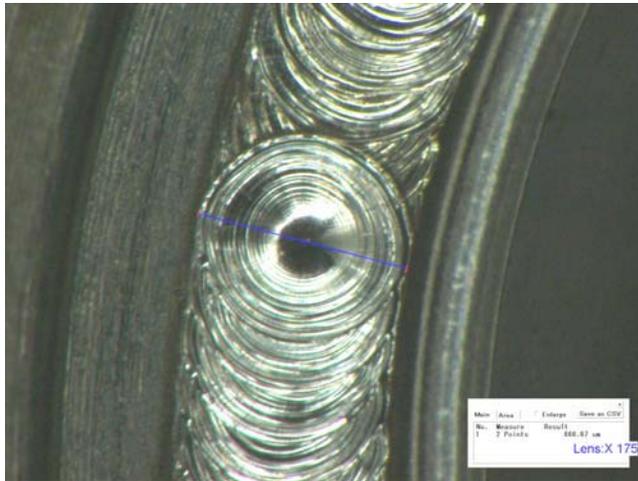


รูปที่ 3 ภาพถ่ายแนวการเชื่อมของการทดลองตอนที่ 1 ด้วยกล้องกำลังขยาย 50 เท่า

AMM064



condition 1-1



condition 3-3

รูปที่ 4 ภาพถ่ายรอยเชื่อมจุดสุดท้ายด้วยกล้องกำลังขยาย 175 เท่า

อย่างไรก็ตามภาพถ่ายแนวการเชื่อมด้วยกล้องกำลังขยาย 50 เท่า ในรูปที่ 3 ไม่สามารถแสดงรายละเอียดที่ชัดเจนของ pinhole และความไม่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมได้ ซึ่งรูปที่ 4 เป็นภาพถ่ายรอยเชื่อมจุดสุดท้ายด้วยกล้องกำลังขยาย 175 เท่า จากรูปที่ 4 ทำให้เราสามารถมองเห็นลักษณะของ pinhole และความไม่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมได้ชัดเจนขึ้น

3.3.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

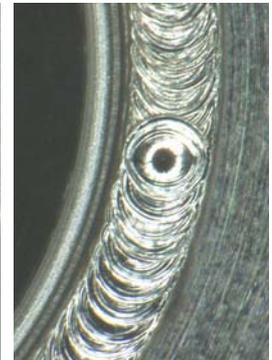
ตารางที่ 6 ตารางบันทึกผลการทดลองตอนที่ 2

condition	pulse energy (J/p)	การตรวจสอบ		
		ความเป็นระเบียบ	pin hole	He-leak
A	3.9-4.2	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
B	4.0-4.3	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
C	4.1-4.4	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
D	4.2-4.5	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
E	4.3-4.6	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

ตารางที่ 6 แสดงผลการตรวจสอบจากการเชื่อมด้วยเงื่อนไขต่างๆ ตามตารางเงื่อนไขการทดลองตอนที่ 2 รวมทั้งค่าพลังงานที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อม ส่วนรูปที่ 5 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลองซึ่งทั้ง 5 เงื่อนไข รอยเชื่อมเป็นระเบียบและไม่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้น



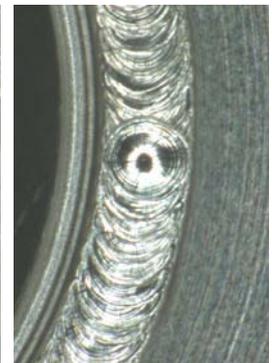
condition A



condition B



condition C



condition D



condition E

รูปที่ 5 ภาพถ่ายแนวการเชื่อมของการทดลองตอนที่ 2 ด้วยกล้องกำลังขยาย 100 เท่า

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เกิดขึ้นกับลักษณะของรอยเชื่อมมีดังนี้

- ค่าพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่า อยู่ระหว่าง 3.1-3.8 จูลต่อพัลส์ รอยเชื่อมไม่เป็นระเบียบ และมีโอกาสการเกิด pinhole ได้ง่าย เนื่องจากพลังงานที่ได้รับยังไม่เพียงพอที่จะสามารถทำให้วัสดุบริเวณที่ทำการเชื่อมหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์

- ค่าพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่า อยู่ระหว่าง 3.8-4.7 จูลต่อพัลส์ รอยเชื่อมเป็นระเบียบ และไม่มี pinhole เกิดขึ้น เนื่องจากพลังงานที่ได้รับเพียงพอที่จะทำให้วัสดุบริเวณที่ทำการเชื่อมหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 2

ช่วงของพลังงานที่เกิดขึ้นในหนึ่งพัลส์มีค่าใกล้เคียง 4.2 จูลต่อพัลส์ คือ อยู่ในช่วง 3.9-4.6 จูลต่อพัลส์ หากทำการเชื่อมด้วยพลังงานในช่วงดังกล่าว ลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้จะไม่แตกต่างกันกล่าวคือ มีความเป็นระเบียบของรอยเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องบนรอยเชื่อมเกิดขึ้น

4.3 ความสัมพันธ์ของพลังงานของเครื่องเลเซอร์กับค่าความต่างศักย์และเวลาที่ใช้ในการเชื่อม

1. ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เกิดขึ้นในหนึ่งพัลส์กับความต่างศักย์ที่ใช้ในการปล่อยแสงเลเซอร์หนึ่งพัลส์ (เมื่อ เวลาคงที่)

จะได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังนี้

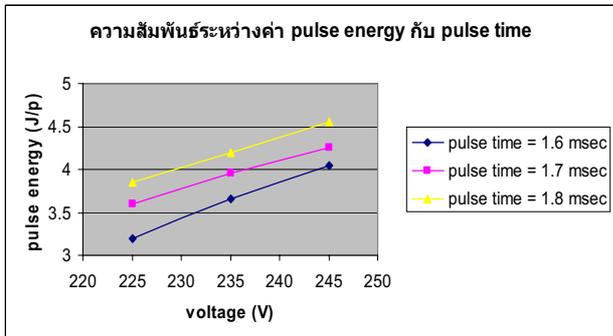
ที่ pulse time 1.6 msec ; $E = 0.0425V - 6.3542$ (2)

ที่ pulse time 1.7 msec ; $E = 0.0325V - 3.7042$ (3)

ที่ pulse time 1.8 msec ; $E = 0.035V - 4.025$ (4)

กำหนดให้ E คือ ค่า pulse energy (J/p)

V คือ ค่า voltage (Volt)



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pulse energy และ pulse time เมื่อ voltage คงที่

2. ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เกิดขึ้นในหนึ่งพัลส์กับเวลาที่ใช้ในการปล่อยแสงเลเซอร์หนึ่งพัลส์ (เมื่อ ความต่างศักย์คงที่)

จะได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังนี้

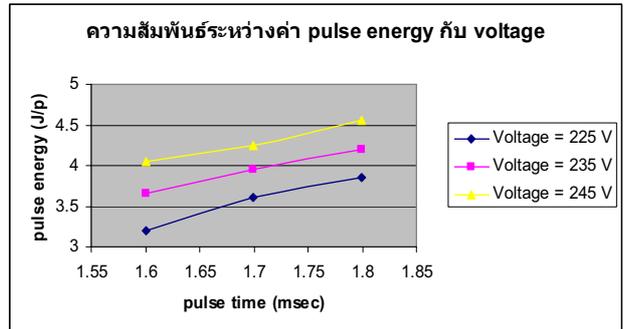
ที่ Voltage 225 V ; $E = 3.25t - 1.975$ (5)

ที่ Voltage 235 V ; $E = 2.75t - 0.7417$ (6)

ที่ Voltage 245 V ; $E = 2.5t + 0.033$ (7)

กำหนดให้ E คือ ค่า pulse energy (J/p)

t คือ ค่า pulse time (msec)



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pulse energy และ voltage เมื่อ pulse time คงที่

ความสัมพันธ์ที่ได้จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 มีประโยชน์คือ สามารถใช้ทำนายค่าพลังงานที่ได้จากการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้ค่าความต่างศักย์และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่าง ๆ กัน เพื่อใช้ในการทำโมเดล สำหรับการออกแบบเงื่อนไขในการทดลองอื่นๆ นอกเหนือจากเงื่อนไขที่เคยใช้ในการทดลองตอนที่ 1 และ 2

5. สรุป

จากการทดลองจะเห็นว่า ลักษณะของรอยเชื่อมทั้งในเรื่องความเป็นระเบียบและการเกิดจุดบกพร่องนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าของพลังงานที่แสงเลเซอร์ส่งมายังชิ้นงาน คือจะมีค่าพลังงานอยู่ช่วงหนึ่งที่สามารถทำให้ลักษณะของรอยเชื่อมสมบูรณ์ ถ้าค่าพลังงานที่ให้กับชิ้นงานมีค่าน้อยกว่าค่านี้จะทำให้รอยเชื่อมเกิดความไม่เป็นระเบียบและอาจมีจุดบกพร่องเกิดขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้เราสามารถหาช่วงของค่าพลังงานที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการเชื่อมชิ้นงานคือมีค่าอยู่ที่ 3.8-4.7 จูลต่อพัลส์ หากค่าพลังงานต่ำกว่า 3.8 จูลต่อพัลส์ จะทำให้รอยเชื่อมที่ได้ไม่เป็นระเบียบและมี pinhole เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นยังมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของรอยเชื่อมอีกหลายตัวแปร อาทิเช่น pulse time, pulse shape ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานของเลเซอร์ รวมทั้งการกระจายความร้อนในระหว่างการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของ pulse time และ pulse shape ของแสงเลเซอร์ที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมในลำดับต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท NIDEC HI-TECH MOTOR (THAILAND) CO., LTD. ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านอุปกรณ์ สถานที่ และทุนในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Wilson , J. F. B. Hawkes , รศ.สุรพล รักวิจิย์ เรียบเรียง ,
“เลเซอร์ ทฤษฎีและการประยุกต์,” เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า , 2544 .
- [2] รองศาสตราจารย์ ดร.วุทธิ พันธุมนาวิน, เลเซอร์ฟิสิกส์ (LASER PHYSICS), 2532, โรงพิมพ์ มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- [3] W. W. Duley University of waterloo , “Laser Welding,” JOHN WILEY & SONS , INC. , 1998 .
- [4] A. Haboudou, P. Peyre, A. B. Vannes , and G. Peix, 2003.
Reduction of porosity content generated during Nd: YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys