

การควบคุมความสม่ำเสมอแนวเชื่อมเลเซอร์ด้วยอุณหภูมิบ่อหลอม โดยวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้

Laser Welding Weld Bead Uniformity Control Using Molten Pool Temperature by Closed Loop Adaptive PID

ธีรวัฒน์ เบ็ญจวิไลกุล^{1*}
Teerawat Benjawilaikul^{1*}

Received: 24 July 2024

Revised: 3 February 2025

Accepted: 19 February 2025

บทคัดย่อ

การเชื่อมเลเซอร์มีข้อดีหลากหลายประการ คือ มีอัตราการจ่ายพลังงานสูง ส่งผลให้แนวเชื่อมที่ได้มีการหลอมละลายซึมลึกที่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาต่างกันแนวเชื่อมอาจเกิดข้อบกพร่องขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอการควบคุมกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1018) ที่มีช่วงความหนา 0.5 - 1.0 มิลลิเมตร โดยใช้การประมวลผลภาพจากกล้องอินฟราเรดที่นำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมมาวิเคราะห์และส่งข้อมูลให้กับระบบควบคุมพีไอดีที่ปรับอัตราขยายได้ (Adaptive PID) เพื่อควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยที่เป็นตัวแปรนำเข้าหลัก สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้า (Power) ให้มีความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานโดยใช้ค่ากำลังขยาย $K_p = 0.003-0.0075$, $K_i = 0.0002 - 0.0005$ และ $K_d = 0.003 - 0.021$ ซึ่งพบว่าระบบควบคุมการเชื่อมเลเซอร์พีไอดีแบบปรับค่าได้ด้วยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอม สามารถควบคุมกำลังเลเซอร์เพื่อรักษาอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมให้มีความแม่นยำอยู่ที่ ± 3 °C จากจุดตั้งค่า โดยแนวเชื่อมที่ได้มีความสม่ำเสมอและมีการซึมลึกที่สมบูรณ์

คำสำคัญ: เชื่อมเลเซอร์ การควบคุมแบบวงปิดพีไอดี การประมวลผลภาพ

¹โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10800

¹Thai-German Pre-Engineering School, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology Norit Bangkok, Bangkok, Thailand 10800

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author) e-mail: Teerawat.e@cit.kmutnb.ac.th

ABSTRACT

Laser welding offers significant benefits, including a high energy input rate that results in a fully penetrated weld seam. However, the quality of the weld may be compromised when joining workpieces with inconsistent thickness. This research proposes a control method for the laser welding process of low carbon steel (AISI 1018) with thicknesses ranging from 0.5 to 1.0 millimeters. This study utilizes infrared camera imaging to analyze the average temperature in the molten pool and then sends this data to an Adaptive PID control system. This system regulates the average temperature, which serves as a primary input variable to control the welding power, by using gain $K_p = 0.003-0.0075$, $K_i = 0.0002 - 0.0005$ and $K_d = 0.003 - 0.021$ thereby ensuring a correlation with the thickness of the workpieces. The study found that the Adaptive PID control system for laser welding effectively maintain the average temperature in the molten pool with an accuracy of ± 3 °C from the setpoint. As a result, the weld seams demonstrate consistency and complete penetration.

Keywords: Laser welding; Close loop control by PID; Image processing

บทนำ

เทคโนโลยีการเชื่อมเลเซอร์ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ [1, 2] อุตสาหกรรมท่อเรือ [3] การบินและอวกาศ [4, 5] อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [6, 7] และอุตสาหกรรมอื่นๆ [8] ด้วยเหตุผลที่ว่ากระบวนการเชื่อมเลเซอร์มีข้อดีหลากหลายประการ คือมีการกระจายความร้อนที่น้อย (Minimized heat affected zone) เกิดการเสียรูปหลังการเชื่อมน้อย (Lower distortion) มีกำลังไฟฟ้ที่สูงสามารถเชื่อมให้หลอมละลายซึมลึก (Penetration) ได้ดี ซึ่งในกระบวนการเชื่อมเลเซอร์นั้นจะไม่มีสัมผัสกันระหว่างหัวเลเซอร์กับชิ้นงานทำให้สามารถเชื่อมชิ้นงานในบริเวณที่เข้าถึงยาก แต่อย่างไรก็ดีในการเชื่อมเลเซอร์โดยเฉพาะในการเชื่อมกับวัสดุที่มีลักษณะบาง (ความหนาไม่เกิน 1 มม.) มีความยากในการควบคุมกระบวนการเชื่อมเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่หลอมละลายซึมลึกที่สมบูรณ์ (Full Penetration) สาเหตุเนื่องมาจากพฤติกรรมระหว่างการเชื่อมมีหลายปัจจัยที่สามารถส่งผลทำให้เกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อม ได้แก่ อัตราการหลอมละลายของวัสดุงาน การเปลี่ยนแปลงความร้อนในระหว่างทำการเชื่อม ส่วนผสมของเนื้อวัสดุที่นำมาเชื่อม ชิ้นงานที่นำมาเชื่อมมีความหนาไม่คงที่ การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมไม่ถูกวิธี เป็นต้น ด้วยเหตุที่กล่าวมานี้การใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเชื่อมในการตั้งค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมเลเซอร์จึงอาจจะไม่เพียงพอสำหรับการทำงานจริง

สำหรับการเชื่อมเลเซอร์ด้วยระบบการตรวจสอบและควบคุมแบบป้อนกลับลักษณะเรียลไทม์ (Real time monitoring and feedback control) เป็นการนำกล้องอินฟราเรด (Infrared camera) [9-13] มาใช้รับข้อมูลพฤติกรรมของบ่อหลอมในขณะที่ทำการเชื่อมเลเซอร์ พร้อมทั้งออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆในขณะที่เชื่อม จะสามารถช่วยให้ได้แนวเชื่อมที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถ

ลดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างดี Speka และคณะ [14] ได้ใช้กล้องอินฟราเรดตรวจจับภาพเพื่อบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวแนวเชื่อมผิว แล้วทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่รับกับการจำลองทางตัวเลข ผลการทดลอง พบว่าอินฟราเรดเซนเซอร์มีความแม่นยำสำหรับการตรวจสอบอุณหภูมิของบริเวณที่กำลังเชื่อม Weberpals และคณะ [15] ได้ทำการตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิและโครงสร้างของรูปร่างในบริเวณที่กำลังเชื่อมด้วยการวิเคราะห์การแผ่รังสีของความร้อน การตรวจสอบด้วยวิธีนี้สามารถนำมาหาค่าความเอนเอียงของโพรงหลอมลึก (Keyhole) ได้ สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการหลอมละลายเชื่อมลึกลับที่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมวัสดุงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกรรมมีความหนาต่างกัน ระหว่าง 0.5–1.0 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมของแนวเชื่อม โดยการใช้ระบบควบคุมแบบวงปิดพีไอดีที่ปรับอัตราขยายได้ [16] เพื่อรักษาแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอมากที่สุดและให้ได้แนวเชื่อมที่มีการหลอมละลายเชื่อมลึกลับที่สมบูรณ์

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยผู้วิจัยได้ทำการติดกล้องอินฟราเรดเพื่อติดตามพฤติกรรมบริเวณบ่อหลอมในขณะที่ทำการเชื่อมเลเซอร์และนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมของแนวเชื่อมมาทำการวิเคราะห์ผล จากนั้นทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมเลเซอร์กับการเชื่อมขึ้นงานที่มีความหนาในช่วง 0.5-1.0 มิลลิเมตร ตามเงื่อนไขต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ผลการควบคุมของระบบ

1. การติดตั้งอุปกรณ์การเตรียมชิ้นงานสำหรับงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งเครื่องเชื่อมเลเซอร์ รุ่น JenLas CW500 มีกำลังเลเซอร์สูงสุด 500 วัตต์หัวเลเซอร์ติดตั้งทำมุม 10 องศาเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับไปยังเลเซอร์ มีระยะดีโฟกัส (DeFocus) +25 มิลลิเมตร ติดตั้งกล้องอินฟราเรดให้มีระยะห่างจากชิ้นงาน 300 มิลลิเมตรและทำมุม 15 องศา เพื่อรับภาพขณะทำการเชื่อมขึ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 1

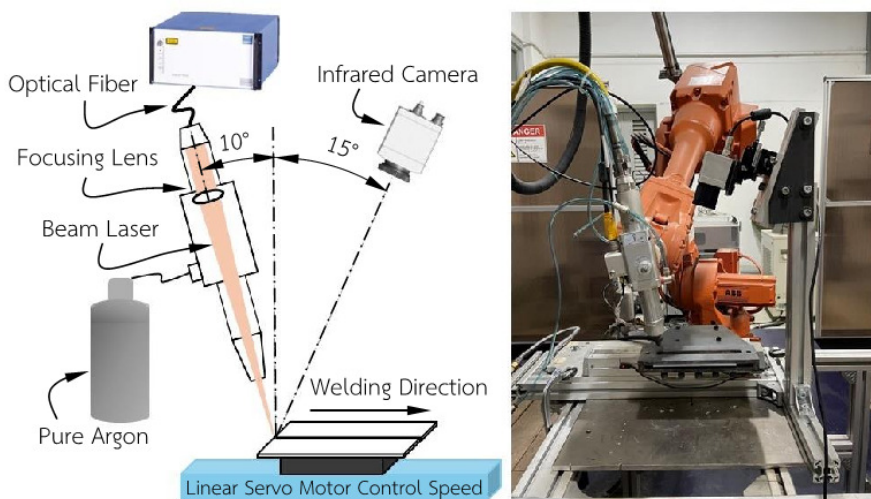


Figure 1 Experimental Setup

ภาพที่ 2 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1018) โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ 1. ทดสอบการเชื่อมชิ้นงานกรณีความหนาคงที่ 0.5, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ขนาด 38x150 มิลลิเมตร ถูกยึดติดกันแบบจุด (Spot Weld) จำนวน 3 จุด เป็นการต่อชนแบบทำราบและ 2. ทดสอบการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาไม่คงที่ (Step Change Thickness) ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีความหนา 1.0 มิลลิเมตร ขนาด 38x150 มิลลิเมตร ถูกยึดติดกันแบบจุด จำนวน 2 จุด จากนั้นนำชิ้นงานไปกัดเป็นร่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ลึก 0.5 มิลลิเมตรมีความยาวร่อง 75 มิลลิเมตร

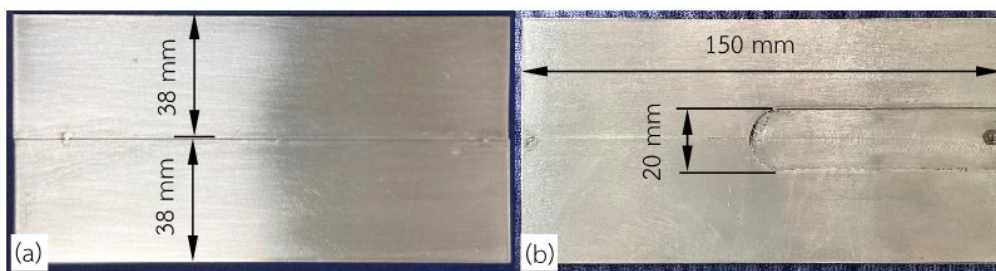


Figure 2 Specimens (a) Constant thickness (b) Step Thickness

2. วิธีการเก็บข้อมูลของงานวิจัย

การเก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อมจะสามารถทำได้ดังนี้ คือ เก็บค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงความยาวของแนวเชื่อมที่ระยะ 25-125 มิลลิเมตร เก็บข้อมูลทุกๆความยาวที่ 0.25 มิลลิเมตร รวมเป็นข้อมูลทั้งหมด 400 ข้อมูล วัดค่าอุณหภูมิด้วยการใช้โปรแกรม Optris PIX Connect ที่เชื่อมต่อกับกล้องอินฟราเรด ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งออกมาเป็นค่าอนุภาคเอาต์พุตช่วง 0-10 โวลต์ ซึ่งมีค่าอุณหภูมิช่วง 450–1,800 °C จากนั้นตั้งค่ารูปแบบของอุณหภูมิและกำหนดสีภายในภาพเพื่อตั้งเป็นค่าพารามิเตอร์ โดยกำหนดค่าอุณหภูมิที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 900 °C ให้เป็นสีน้ำเงิน ค่าอุณหภูมิที่สูงกว่า 900 °C จนถึง 1,400 °C ให้เป็นสีเขียว เพื่อแสดงพื้นที่บริเวณบ่อหลอมของแนวเชื่อม และค่าอุณหภูมิที่สูงกว่า 1,400 °C จัดให้เป็นพื้นที่โพรงหลอมลึก (Keyhole) พื้นที่ตรงส่วนนี้จะแสดงภาพเป็นสีขาวดังแสดงในภาพที่ 3

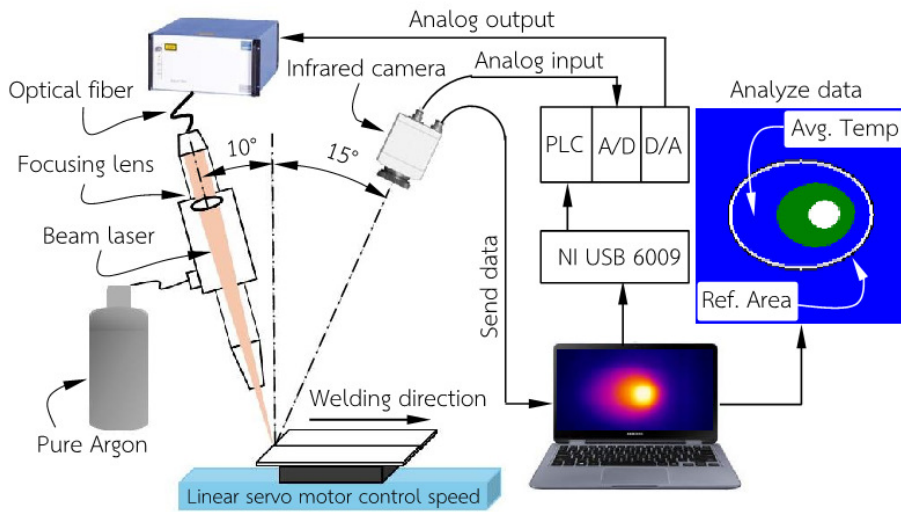


Figure 3 Diagram of laser welding with close loop PID

3. การหาจุดตั้งค่า (Set Point)

การหาจุดตั้งค่าสำหรับการควบคุมการเชื่อมเลเซอร์แบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมของแนวเชื่อม เป็นการหาความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองการเชื่อมเลเซอร์แบบวงเปิดระหว่างความหนาชิ้นงานที่นำมาเชื่อมเลเซอร์กับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมของแนวเชื่อม เพื่อนำไปใช้เป็นจุดตั้งค่าสำหรับระบบควบคุมแบบวงปิดพีไอดี ในส่วนของอัลกอริทึมของระบบควบคุมแบบวงปิดพีไอดี โดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยจะแสดงในภาพที่ 4

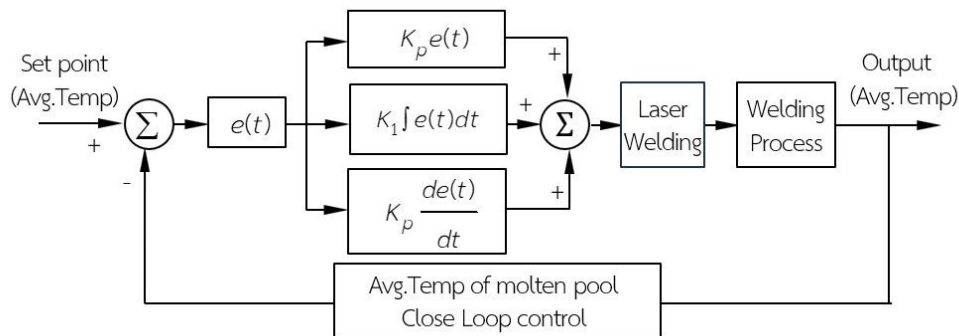


Figure 4 Close loop PID algorithm using average temperature of laser welding

ระบบการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีเป็นการปรับค่าความไว (Gain) K_p , K_i และ K_d ที่เหมาะสมในการเชื่อมชิ้นงานที่มีขนาดความหนาต่างๆ ตามหลักการของซีกเกลอร์-นิโคลล์ (Ziegler-Nichols method) [17] ระบบการควบคุมแบบปรับค่าอัตราขยายได้จะเป็นการนำค่าอัตราขยายแบบคงที่มารับใช้ โดยอัลกอริทึมการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีที่ปรับค่าอัตราขยายได้จะแสดงในภาพที่ 5 โดยเทคนิคดังกล่าวจะสามารถปรับค่าความไว (Gain) ตามความหนาชิ้นงานที่ทำการเชื่อมได้โดยอัตโนมัติ

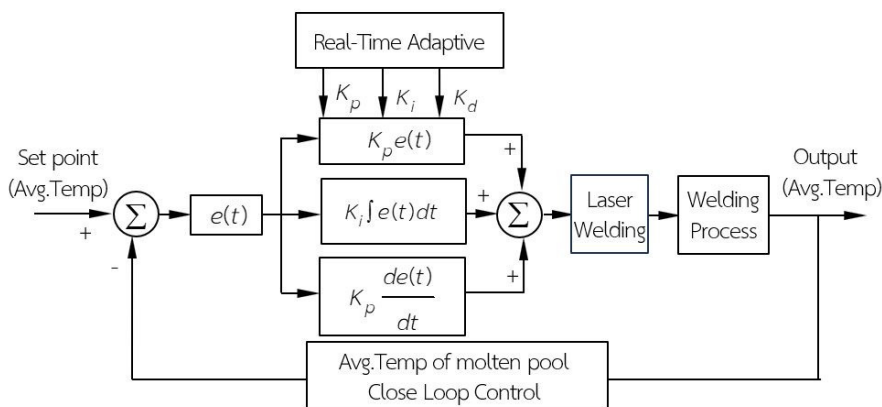


Figure 5 Real-Time adaptive close loop PID algorithm using average temperature of laser welding

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองและอภิปรายผลจะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อได้แก่ 1.ผลการเชื่อมเลเซอร์ด้วยระบบการควบคุมแบบวงเปิด (Open Loop Control) กรณีเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาคงที่ 0.5, 0.8 และ 1 มิลลิเมตร ใช้กำลังไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 100, 200, 300, 400 และ 500 วัตต์ ในการหาอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอม เพื่อให้ทราบกำลังไฟฟ้าในการเชื่อมที่เหมาะสมกับความหนาชิ้นงาน 2.ผลการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยกรณีเชื่อมชิ้นงานหนาคงที่ 0.5, 0.8 และ 1 มิลลิเมตร เพื่อนำผลการทดลองไปใช้สำหรับการเชื่อมชิ้นงานความหนาไม่คงที่ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ย กรณีเชื่อมชิ้นงานหนาไม่คงที่ 3.ผลการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยกรณีเชื่อมชิ้นงานหนาไม่คงที่ โดยเป็นการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความหนาเปลี่ยนแปลงไปจาก 1.0 มิลลิเมตรไป 0.5 มิลลิเมตรและความหนาชิ้นงาน 0.5 มิลลิเมตรไป 1.0 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบพฤติกรรมระหว่างการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาไม่คงที่ จากนั้นนำอัตราขยายที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในกรณีการควบคุมแบบที่สามารถปรับอัตราขยายได้ และ 4.การเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยที่ปรับค่าอัตราขยายได้กรณีชิ้นงานมีความหนาไม่คงที่

1. ผลการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงเปิดกรณีชิ้นงานที่มีความหนาคงที่

การทดลองในหัวข้อนี้เพื่อหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในพื้นที่ที่กำหนด มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมกับความหนาของชิ้นงานโดยผลการทดลองสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมจะแสดงได้ดังภาพที่ 6 เมื่อพิจารณานำค่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเชื่อมของชิ้นงานแต่ละความหนา มาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 7

โดยเกณฑ์การพิจารณาในการเลือกนั้นจะเลือกเฉพาะชิ้นงานที่มีแนวเชื่อมซีมล็กสมบูรณ์เท่านั้น และเมื่อนำผลมาวิเคราะห์จะได้เป็นไปตามสมการที่ 1 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับความหนาชิ้นงานในช่วง 0.5 – 1 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้ในการเชื่อมชิ้นงานตามความหนาในช่วงที่ต้องการได้

Table 1 Experimental results of proper laser power to temperature on varies thickness

Thickness (mm)	Power (Watt)		Temperature(°C)		S.D.
	Min	Max	Min	Max	
0.5	200	300	908	1,059	10.92
0.8	300	400	982	1,061	7.05
1	400	500	1,000	1,072	9.14

Set Point 1,000 °C

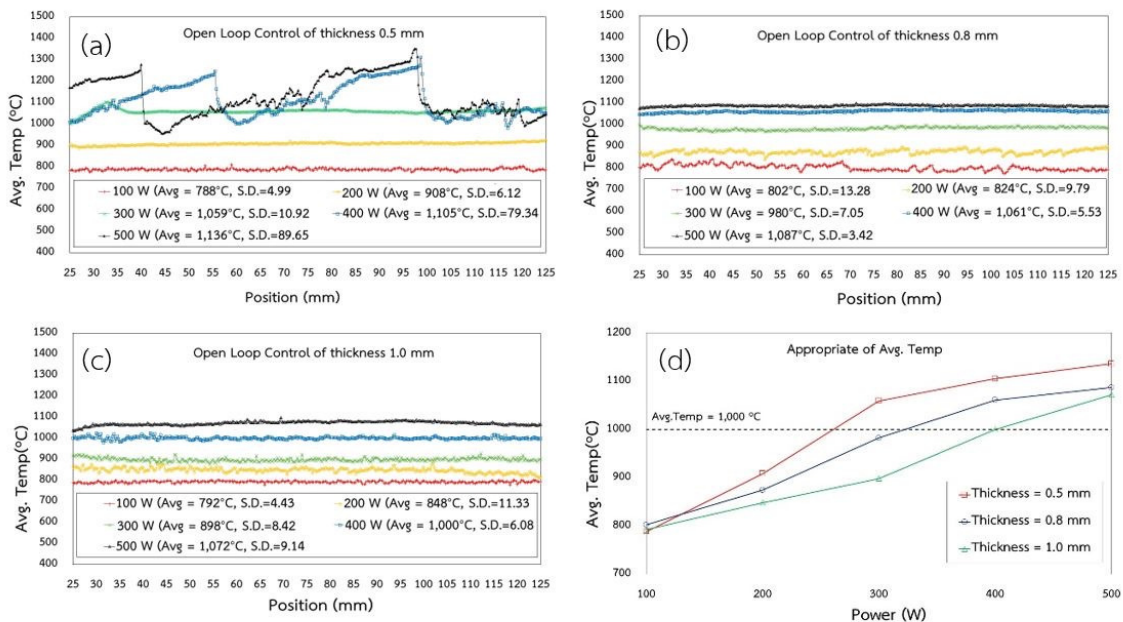


Figure 6 Average temperature of close loop control on power 100, 200, 300, 400 and 500 watt (a) 0.5 mm (b) 0.8 mm (c) 1 mm and (d) Avg. Temp

2. ผลการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี กรณีชิ้นงานมีความหนาคงที่

การเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ย ในการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนา 0.5, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ตั้งค่าจุดตั้งค่าที่ 1,000 °C ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงเปิดมาประยุกต์ใช้ จากการทดลองพบว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยได้มีประสิทธิภาพที่ดีแนวเชื่อมที่ได้มีความสม่ำเสมอและหลอมละลายซีมล็กที่สมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 7

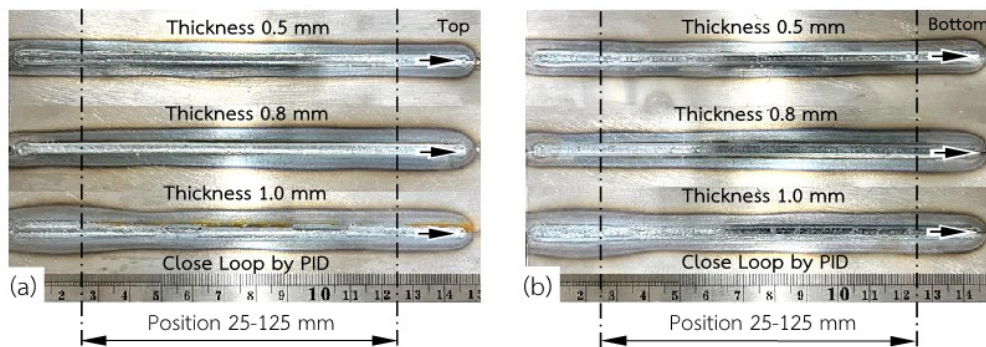


Figure 7 Experimental results of weld bead on the thickness 0.5, 0.8 and 1 mm on closed loop PID with setup point at 1000 °C (a) Top view (b) Bottom view

ภาพที่ 8 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบการควบคุมแบบปิดพีไอดีในการเชื่อมชิ้นงาน 3 ความหนา จากผลการทดลองจะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าในตารางที่ 2 พบว่าการตอบสนองของระบบควบคุมทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิในการเชื่อมลดลง ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ลดลงนั้นเป็นเหตุทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีความสม่ำเสมอและแนวเชื่อมมีการหลอมละลายซึมลึกได้ดีกว่าการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงเปิดในทุกๆ กรณี

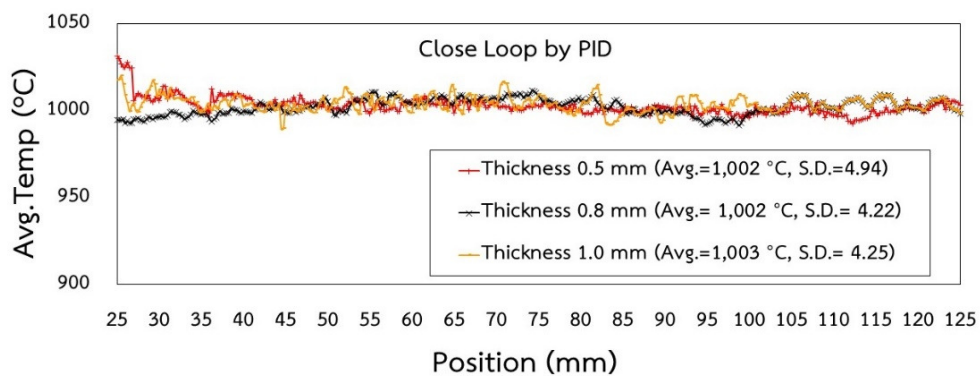


Figure 8 Average temperature and standard deviation of closed loop PID

Table 2 Experimental results of average temperature of closed loop PID in case of constant thickness

Thickness (mm)	Avg. Temp (°C)	S.D.	Percentage error from setpoint	Gain
0.5	1,002	4.94	0.2	$K_p = 0.003$ $K_i = 0.0002$ $K_d = 0.003$
0.8	1,002	4.22	0.2	$K_p = 0.006$ $K_i = 0.0004$ $K_d = 0.015$
1	1,003	4.25	0.3	$K_p = 0.0075$ $K_i = 0.0005$ $K_d = 0.021$

3. ผลการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี กรณีชิ้นงานมีความหนาไม่คงที่

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะเป็นการนำค่าอัตราขยายที่ได้จากผลการทดลองการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีกรณีเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาคงที่มาประยุกต์ใช้ การทดลองในหัวข้อนี้เป็น การเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาเปลี่ยนแปลง 2 กรณี คือ 1. การเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตรไป 0.5 มิลลิเมตร และ 2. การเชื่อมจากชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตรไป 1.0 มิลลิเมตร สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้เป็นการเชื่อมเลเซอร์ด้วยระบบการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ย ค่ากำลังขยายในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 ค่ากำลังขยายที่มากที่สุด คือ $K_p = 0.0075$, $K_i = 0.0005$ และ $K_d = 0.021$ และชุดที่ 2 ค่ากำลังขยายที่น้อยสุด คือ $2K_p = 0.003$, $K_i = 0.0002$ และ $K_d = 0.003$ ซึ่งค่ากำลังขยายที่กล่าวมานั้นได้จากการทดลองตามที่แสดงในตารางที่ 2 โดยการทดลองในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองรวมทั้งสิ้น 4 กรณี

จากภาพที่ 9 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยและอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าในการเชื่อมเลเซอร์ โดยใช้ค่ากำลังขยายมากที่สุดเชื่อมชิ้นงานความหนา 1.0 ไป 0.5 มิลลิเมตรและความหนา 0.5 ไป 1.0 มิลลิเมตรเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในการเชื่อมชิ้นงานความหนา 0.5 มิลลิเมตรมีอัตราการแกว่งของอุณหภูมิสูงกว่าการเชื่อมชิ้นงานความหนา 1.0 มิลลิเมตรโดยภาพแนวเชื่อมของการทดลองนี้แสดงได้ดังภาพที่ 10

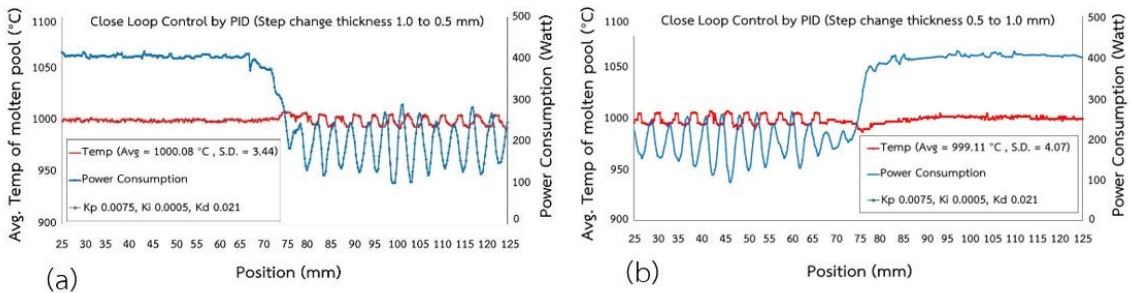


Figure 9 Average temperature and power rate of laser welding on closed loop PID in case of step thickness (PID value: K_p 0.0075, K_i 0.0005, K_d 0.021) (a) Thickness 1.0 to 0.5 mm (b) Thickness 0.5 to 1.0 mm

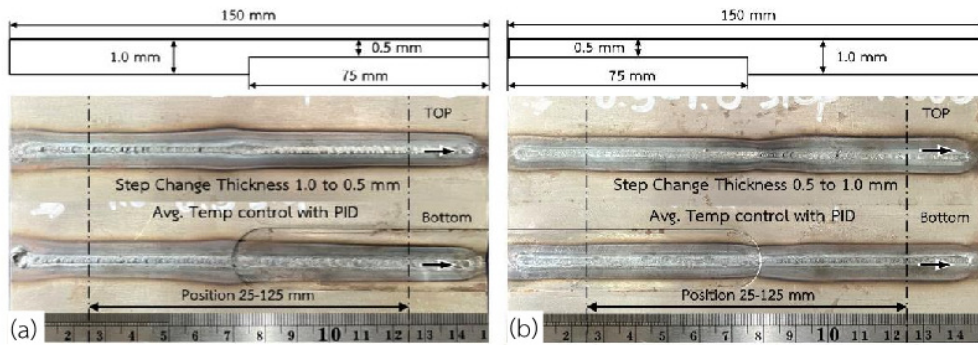


Figure 10 Showed the weld bead of laser welding of closed loop PID in case of step thickness at set up point 1,000 °C (PID value: K_p 0.0075, K_i 0.0005, K_d 0.021) (a) Thickness 1.0 to 0.5 mm (b) Thickness 0.5 to 1.0 mm

จากภาพที่ 11 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยและอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าในการเชื่อมเลเซอร์ โดยใช้ค่าอัตราขยายน้อยที่สุดเชื่อมชิ้นงานความหนา 1.0 ไป 0.5 มิลลิเมตรและความหนา 0.5 ไป 1.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองในการเชื่อมชิ้นงานที่ตำแหน่งเปลี่ยนแปลงความหนาจากความหนา 1.0 ไป 0.5 มิลลิเมตรพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมเพิ่มสูงขึ้นจากนั้นจึงลดลงมาเข้าสู่ในจุดตั้งค่า ในส่วนของการเชื่อมชิ้นงานช่วงตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงความหนาจาก 0.5 ไป 1.0 มิลลิเมตรพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณลดลงแล้วจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ในจุดตั้งค่า แสดงให้เห็นว่าการควบคุมของระบบยังไม่สามารถตอบสนองเพื่อปรับค่ากำลังไฟฟ้าได้เร็วพอที่จะสามารถนำค่าเข้าสู่ในจุดตั้งค่าได้ทัน โดยภาพแนวเชื่อมของการทดลองนี้แสดงได้ดังภาพที่ 12

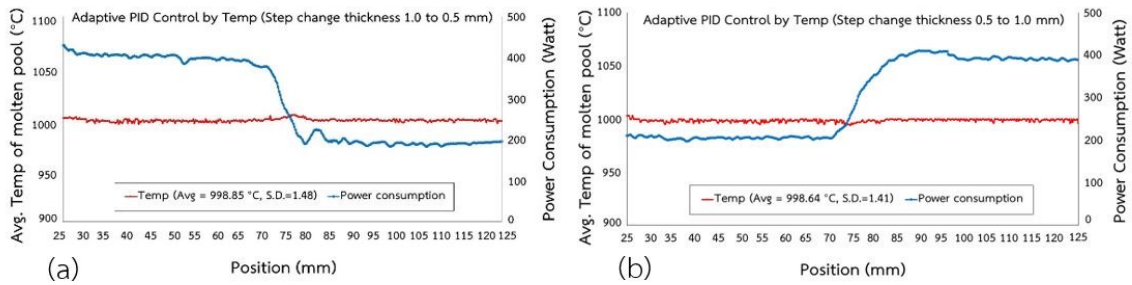


Figure 11 Average temperature and power rate of laser welding on closed loop PID in case of step thickness (PID value: K_p 0.003, K_i 0.0002, K_d 0.003) (a) Thickness 1.0 to 0.5 mm (b) Thickness 0.5 to 1.0 mm

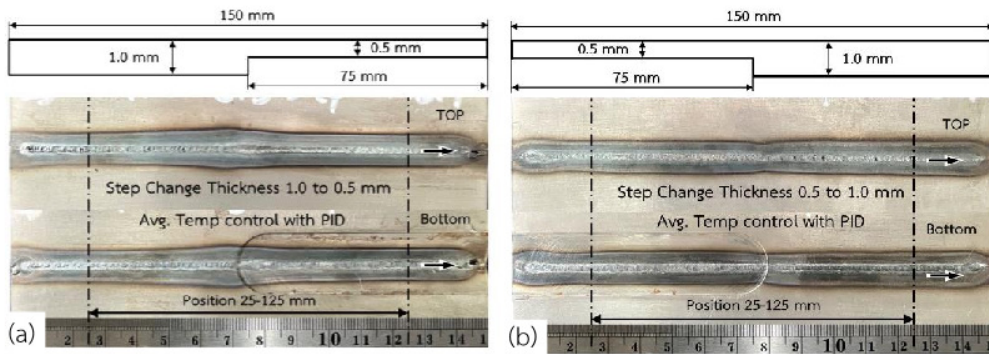


Figure 12 Showed the weld bead of laser welding of closed loop PID in case of step thickness at set up point 1,000 °C (PID value: K_p 0.003, K_i 0.0002, K_d 0.003) (a) Thickness 1.0 to 0.5 mm (b) Thickness 0.5 to 1.0 mm

4. ผลการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี โดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยแบบปรับอัตราขยายได้กรณีชิ้นงานมีความหนาไม่คงที่

จากผลการทดลองการเชื่อมเลเซอร์แบบวงปิดพีไอดีโดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมกรณีในการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาไม่คงที่ทั้ง 4 กรณี พบว่าค่าอัตราขยายมีอิทธิพลต่อการตอบสนองของระบบควบคุมเป็นอย่างมากสำหรับเทคนิคการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี หากยังคงใช้ค่ากำลังขยายคงที่จะทำให้ระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิเฉลี่ยให้คงที่และปรับเข้าสู่จุดตั้งค่าได้ทันในช่วงการเชื่อมชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนา โดยตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังขยายของระบบควบคุมแบบวงปิดพีไอดี โดยการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยแบบปรับอัตราขยายได้โดยค่า K คือ ช่วงค่ากำลังอัตราขยายในการเชื่อมชิ้นงาน

ที่ความหนา 0.5–1.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในการเชื่อมชิ้นงานในหัวข้อที่ผ่านมาทั้ง 4 กรณีจึงทำให้สามารถกำหนดค่ากำลังขยายเริ่มต้น (K_{min} หรือ K_0) ค่ากำลังขยายสูงสุด (K_{max}) และค่า K_f ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณค่ากำลังขยายช่วง 0 – 100% เพื่อจะนำไปใช้เป็นตัวแปรสำหรับคูณเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ (ΔT_{error}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

Table 3 Gain value of closed loop PID by control average temperature in case of step thickness

Gain	K	K_{max}	$K_{min} (K_0)$	K_f
K_p	0.003-0.0075	0.0075	0.003	0.000045
K_i	0.0002-0.0005	0.0005	0.0002	0.000003
K_d	0.003-0.021	0.021	0.003	0.000180

โดยค่า K_f สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$(\Delta T_{error}) = \frac{\text{Setpoint} - \text{now}}{\text{Setpoint}} \times 100 \quad (1)$$

$$K_f = \frac{K_{max} - K_{min}}{100} \quad (2)$$

$$\Delta K_{error} = \Delta T_{error} \times K_f \quad (3)$$

$$K_{p(Adaptive)} = K_{p(0)} + \Delta K_{p(error)} \quad (4)$$

$$K_{i(Adaptive)} = K_{i(0)} + \Delta K_{i(error)} \quad (5)$$

$$K_{d(Adaptive)} = K_{d(0)} + \Delta K_{d(error)} \quad (6)$$

จากสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 6 จะทำให้ทราบค่าของ $K_{p(Adaptive)}$, $K_{i(Adaptive)}$ และ $K_{d(Adaptive)}$ โดยระบบควบคุมการทำงานจะมีการประมวลผลที่ 0.25 วินาทีต่อรอบ ตามเงื่อนไขของอัลกอริทึมที่ได้สร้างขึ้นสำหรับการควบคุมเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสม่ำเสมอและมีการหลอมละลายซึมลึกที่สมบูรณ์

จากภาพที่ 13 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าในการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี โดยควบคุมอุณหภูมิบริเวณบ่อหลอมแบบปรับอัตราขยายได้ กรณีเชื่อมชิ้นงานความหนาไม่คงที่ จากผลการทดลองพบว่า การตอบสนองของระบบควบคุมดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ภาพที่ 14 แสดงแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองกรณีนี้และภาพที่ 15 แสดงภาพขยายของแนวเชื่อมบริเวณช่วงเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน พบว่าบริเวณช่วงการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน ระบบควบคุมสามารถรักษาแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอได้ดีกว่าการควบคุมแบบวงปิดพีไอดีด้วยกำลังขยายที่คงที่

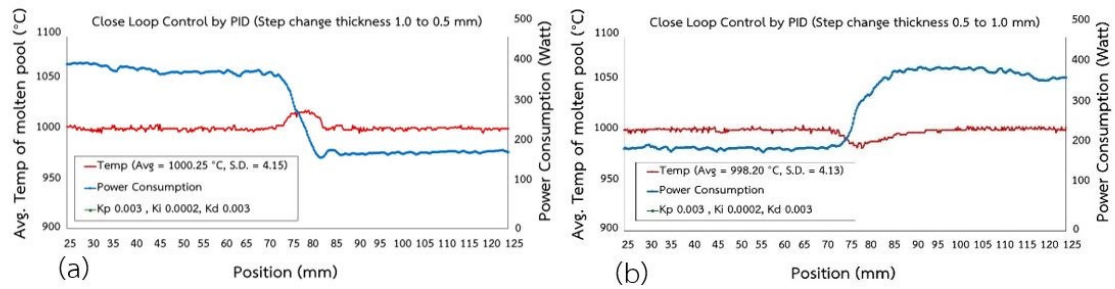


Figure 13 Average temperature and power rate of laser welding on closed loop PID by control AVG. Temperature using varies gain value (a) Thickness 1.0 to 0.5 mm (b) Thickness 0.5 to 1.0 mm

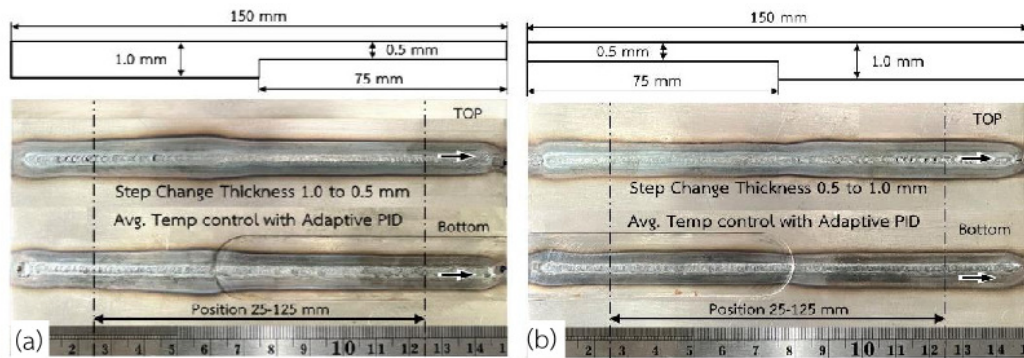


Figure 14 Showed the weld bead of laser welding of closed loop PID by control AVG. Temperature using varies gain value (a) Thickness 1.0 to 0.5 mm (b) Thickness 0.5 to 1.0 mm

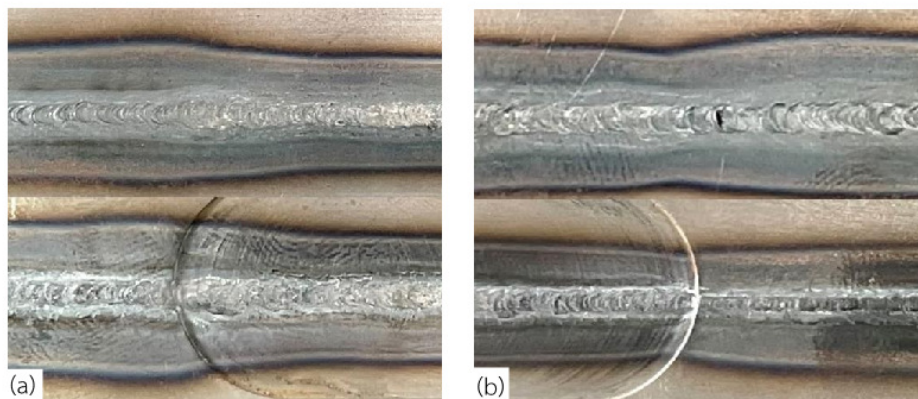


Figure 15 Show enlarged image the bead of laser welding of close loop PID by control AVG.

Temperature using varies gain value (a)Step change 1.0 to 0.5 mm (b)Step change 0.5 to 1.0 mm

สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเชื่อมเลเซอร์กับชิ้นงานที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในลักษณะที่ชิ้นงานมีความหนาแตกต่างกันในช่วงระหว่าง 0.5–1.0 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมให้แนวเชื่อมมีความสม่ำเสมอและมีการหลอมละลายเชื่อมที่สมบูรณ์ด้วยการประมวลผลจากภาพที่ได้จากกล้องอินฟราเรด แล้วนั้นนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแนวเชื่อมมาวิเคราะห์จากนั้นส่งข้อมูลให้กับระบบควบคุมแบบวงปิดพีไอดีที่สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ เพื่อควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมที่เป็นตัวแปรหลักของงานวิจัยนี้ให้เข้าสู่จุดตั้งค่าที่ 1,000 °C โดยค่าจุดตั้งค่านี้นี้จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับระบบควบคุมแบบวงปิดพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมของแนวเชื่อม ผลการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

- ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบ่อหลอมที่ใช้ในการเชื่อมมีความสัมพันธ์แปรผันตามความหนาของชิ้นงาน
- การเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี กรณีเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาคงที่ จากผลการทดลองพบว่าแนวเชื่อมมีความสม่ำเสมอที่ดี โดยมีค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่เกิน 0.3%
- การเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี กรณีเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาไม่คงที่ โดยการใช้ อัตราขยายคงที่ จากผลการทดลองพบว่าแนวเชื่อมที่ได้มีความนูนและความกว้างของรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ สาเหตุเนื่องมาจากบริเวณตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบทำให้ระบบควบคุมไม่สามารถปรับค่าให้เข้าสู่จุดตั้งค่าได้ทัน
- การเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบวงปิดพีไอดี กรณีเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาไม่คงที่ โดยการใช้ อัตราขยายที่ปรับค่าได้ จากการทดลองพบว่าแนวเชื่อมที่ได้มีความสม่ำเสมอ การตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น โดยผลการทดลองนั้นมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 1.48 และมีค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่เกิน 0.146 อีกทั้งมีความแม่นยำไม่เกิน ± 3 °C จากจุดตั้งค่า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0636/2023 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญฤทธิ์ แก้วประชุม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพร แก้ววิจิตร ในการให้คำปรึกษาสำหรับงานวิจัยนี้

References

- [1] Chen, G. et al. (2013). Research on Key Influence Factors of Laser Overlap Welding of Automobile Body Galvanized Steel. *Optics & Laser Technology*, 45, 726-733.
- [2] Hong, K. & Shin, Y. (2017). Prospects of Laser Welding Technology in the Automotive Industry: A Review. *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 46-69.
- [3] Pritschow, G. & Haug, K. (1998). Robust Laser-Stripe Sensor for Automated Weld-Seam Tracking in the Shipbuilding Industry. *The 24th Annual Conference of the IEEE* (p.1236-1241). 31 August – 4 September, 1998, Aachen, Germany.
- [4] Abderrazak, K., et al. (2009). Nd:YAG Laser Welding of AZ91 Magnesium Alloy for Aerospace Industries. *Metallurgical and Material Transactions B*, 40, 54-61.
- [5] Pariona, M., et al. (2012). Yb Fiber Laser Beam Effects on the Surface Modification of Al-Fe Aerospace Alloy Obtaining Weld Fillet Structures, Low Fine Porosity and Corrosion Resistance. *Surface and Coatings Technology*, 206(8-9), 2293-2301.
- [6] Harman, G. & Albers, J. (1977). The Ultrasonic Welding Mechanism as Applied to Aluminum and Gold-Wire Bonding in Microelectronics. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 13(4), 406-412.
- [7] Arnold, G. (2009). Laser Micro Manufacturing: Fast and Reliable Solutions for Joining, Drilling and Structuring. *Laser Technik Journal*, 6(1), 16-29.
- [8] Tapia, G. & Elwany, A. (2014). A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 060801.
- [9] Golubev, V., et al. (2010). Diagnostics of Laser Radiance Penetration into Material by Multi - Channel Pyrometer. In *2010 International Conference on Advanced Optoelectronic and Laser* (p.182-194). 10 September – 14 September, 2010, Sevastopol, Ukraine.
- [10] Bertrand, P., et al. (2000). Application of Near Infrared Pyrometry for Continuous Nd:YAG Laser Welding of Stainless Steel. *Applied Surface Science*, 168(1-4), 182-185.
- [11] Wippo, V., et al. (2012). Evaluation of Apyrometric - based Temperature Measuring Process for the Laser Transmission Welding. *Physics Procedia*, 39, 128-136.
- [12] Kohler, H., et al. (2015). Contact-Less Temperature Measurement and Control with Applications to Laser Cladding. *Welding in the World*, 60, 1-9.

Research Article

Journal of Advanced Development in Engineering and Science

Vol.15 ● No.42 • January – April 2025

- [13] Wang, C., et al. (2020). Application of Sensing Techniques and Artificial Intelligence-based Methods to Laser Welding Real - time Monitoring: A Critical Review of Recent Literature. *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 1-18.
- [14] Speka, M., et al. (2008). The Infrared Thermography Control of the Laser Welding of Amorphous Polymers. *NDT & International*, 41(3), 178-183.
- [15] Weberpals, J., et al. (2011). Utilisation of thermal radiation for process monitoring. *Physics Procedia*, 12, 704-711.
- [16] Qian, S., et al. (2018). Adaptive PID controller based on Q-learning algorithm. *CAA/Transaction on Intelligence Technology*, 3(4), 235-244.
- [17] Ziegler, J. G. & Nichols, N. B. (1942). Optimum Setting for Automatic Controllers. *Transaction of the ASME*, 64, 759-768.