



# การควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมแบบทันทีด้วยวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้โดยใช้การประมวลผลภาพอินฟราเรดในระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟเบอร์เลเซอร์

สิทธิไชย สราญนาส<sup>1</sup> นรินทร์ ชัยธานี<sup>2</sup> และ ทศพร แก้ววิจิตร<sup>\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

<sup>\*</sup> ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thossaporn.k@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 22 สิงหาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 7 กันยายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2566

**บทคัดย่อ:** ไฟเบอร์เลเซอร์มีข้อดีหลายประการได้แก่ ประสิทธิภาพการหลอมสูง พลังงานสูง และลักษณะความหนาแน่นของพลังงาน อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการเชื่อมเลเซอร์หากชิ้นงานมีความหนาไม่คงที่หรือเกิดความบกพร่องระหว่างการเชื่อมนั้นส่งผลกระทบต่อารควบคุม เพื่อให้ได้ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม ดังนั้นงานวิจัยนี้เสนอการควบคุมคุณภาพรอยเชื่อมแบบทันที (Real Time) ของกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟเบอร์เลเซอร์ที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 0.5 มม. ถึง 1.0 มม. โดยใช้การประมวลผลภาพอินฟราเรดในการวิเคราะห์ภาพของบ่อหลอมระหว่างกระบวนการเชื่อมและส่งข้อมูลเป็นข้อมูลนำเข้าให้ระบบควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ (Adaptive PID) เพื่อควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอ (Uniform Weld Bead) โดยใช้ความกว้างของบ่อหลอมที่ได้จากการประมวลผลภาพเป็นตัวแปรนำเข้าหลัก สำหรับควบคุมกำลัง (Power) ของไฟเบอร์เลเซอร์ให้สัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งพบว่าระบบควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ สามารถควบคุมกำลังเลเซอร์เพื่อรักษาความกว้างของบ่อหลอมให้อยู่ในช่วงความแม่นยำ  $\pm 1.0$  มม. จากจุดตั้งค่า ผลการทดลองพบว่าแนวเชื่อมมีการหลอมลึก (Full Penetration) และสม่ำเสมอ โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกรณีการเปลี่ยนแปลงความหนาในทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. เท่ากับ 0.22 และในทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม. เท่ากับ 0.23 ดังนั้นเทคนิคการควบคุมป้อนกลับดังกล่าวมีความเหมาะสมกับระบบการเชื่อมด้วยเลเซอร์อัตโนมัติของแผ่นโลหะที่ไม่ทราบความหนาที่อยู่ระหว่างความหนา 0.5 มม. ถึง 1.0 มม.

**คำสำคัญ:** ไฟเบอร์เลเซอร์; การควบคุมแบบป้อนกลับ; การประมวลผลภาพ; เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

# Real-time Feedback Control for Uniform Weld Bead using Adaptive PID Controller with Infrared Image Processing in Fiber Laser Welding of Low Carbon Steel

Sitthichai Sarannat<sup>1</sup>, Naren Chaithanee<sup>2</sup> and Thossaporn Kaewwichit<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology

\* Corresponding author, E-mail: thossaporn.k@cit.kmutnb.ac.th

Received: 16 June 2023; Revised: 22 August 2023; Accepted: 7 September 2023

Online Published: 21 December 2023

**Abstract:** Fiber laser has considerable advantages; that is, high melting efficiency, high power, and power density. However, during the welding process, if the thickness of the steel sheet is not stable or the process has a defect, this could affect the control. To make the continuity in welds, the research is intended to propose a quality control system for the real-time weld beads. The process involves the welding of the low-carbon steel sheet by laser fiber of varying thicknesses of 0.5 to 1.0 mm. The infrared image processing is used to determine the molten pool during the welding process. Then, this data is input to the adaptive PID feedback control system in order to control the width of the weld bead quality (Uniform Weld Bead). In this regard, the width of the molten pool is used as the main input parameter for controlling the power of the fiber laser in accordance with the steel sheet thickness. The research results indicate that the adaptive PID can control the power of the fiber laser so that the molten pool width is maintained within  $\pm 1.0$  mm. accuracy from the setting point. Moreover, the experiment shows that the weld beads have full penetration and continuity. The standard deviations of the thickness adjustment in the 0.5-1.0 mm. and 1.0-0.5 mm directions are 0.22 and 0.23 respectively. Therefore, the feedback control technique is appropriate for the automatic laser welding of the worksheets with a thickness of 0.5-1.0 mm.

**Keywords:** Laser welding; Feedback control; Image processing; Low carbon steel sheet



## 1. บทนำ

ในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากข้อดีหลายประการได้แก่ กำลังวัตต์สูง แสงเลเซอร์มีประสิทธิภาพสูง และมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ในการใช้ประโยชน์สำหรับงานเชื่อมในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมท่อเรือและอื่นๆ [1-3] มีผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมในระหว่างกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ เช่น ค่าอุณหภูมิในบ่อหลอมและบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) ขนาดบ่อหลอม (Molten Pool) ขนาดของคีย์โฮลด์ (Key Hole) รวมถึงขนาดพื้นที่และรูปร่างของบ่อหลอม เพื่อหาความสัมพันธ์ในการบ่งบอกถึงคุณภาพของงานเชื่อมได้ และใช้สำหรับการติดตามและการควบคุมกระบวนการเชื่อมแบบทันที เพื่อช่วยลดของเสียและลดต้นทุนการผลิต [4-5]

การกระจายตัวของความร้อนในระหว่างการเชื่อมซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของแนวเชื่อมและชิ้นงานโดยตรง โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความหนาต่ำกว่า 1 มม. [6-8] พบว่ามีการติดตามอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อมและการกระจายตัวของความร้อนเพื่อรักษาคุณภาพการเชื่อมด้วยการใช้เซนเซอร์แบบไม่สัมผัส ได้แก่ ไพโรมิเตอร์ (Pyrometers) กล้องอินฟราเรด (Infrared Camera) การใช้เซนเซอร์ร่วมกันหลายตัว (Multi Sensors) และการใช้กล้องอุตสาหกรรมความเร็วสูง (High Speed CCD Camera) เพื่อกำหนดตัวแปรนำเข้าที่พร้อมสำหรับการวัดและตรวจสอบที่สามารถวิเคราะห์การเชื่อมด้วยเลเซอร์ได้ [4,10,14] อย่างไรก็ตามในสภาวะการทำงานจริงนั้นการเชื่อมเลเซอร์ โดยเฉพาะ

วัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 1 มม. มีความยากในการควบคุมของกระบวนการทำงานเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากพฤติกรรมในระหว่างการเชื่อมมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเปลี่ยนแปลง และทำให้เกิดจุดบกพร่องไม่คงที่ เช่น แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ แนวเชื่อมทะลุ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อมเหล่านั้นได้แก่ ความหนาของชิ้นงานไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ส่วนผสมของวัสดุ การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม เป็นต้น ดังนั้นการใช้ประสบการณ์ในการปรับตั้งอาจไม่เพียงพอต่อกระบวนการทำงานจริง ด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ การควบคุมแบบพีไอดี (PID) ที่เป็นระบบป้อนกลับแบบหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมอย่างหลากหลาย และกระบวนการเชื่อมในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น ระบบเชื่อมอาร์คอัตโนมัติด้วยพีไอดีบนกระบวนการเชื่อมแบบ SMAW [11] การนำระบบป้อนกลับแบบพีไอดีมาใช้ร่วมกับระบบตัดสินใจ ตรรกศาสตร์คลุมเคลือบบนกระบวนการเชื่อม MIG ของชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ให้ผลของสัญญาณความถี่ที่มีความเสถียรและรอยเชื่อมดี [12] หรือนำไปใช้ร่วมกับโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันในการควบคุมกำลังวัตต์ของเครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบสั่งการระยะไกลโดยให้ผลกับประสิทธิภาพของระบบสั่งการและเวลาตอบสนองของสัญญาณที่ดีขึ้น [13] ทำให้เป็นที่รู้จักในด้านความสามารถให้เสถียรภาพและความสม่ำเสมอในระบบควบคุม ในการเชื่อม การรักษากระบวนการเชื่อมให้คงที่และรอยเชื่อมสม่ำเสมอโดยมีข้อบกพร่องน้อยที่สุด การควบคุมพีไอดี สามารถช่วยปรับพารามิเตอร์ในการควบคุมคุณภาพการเชื่อม มีส่วนช่วยในการปรุง



ประสิทธิภาพการผลิต และปรับปรุงประสิทธิภาพการเชื่อม

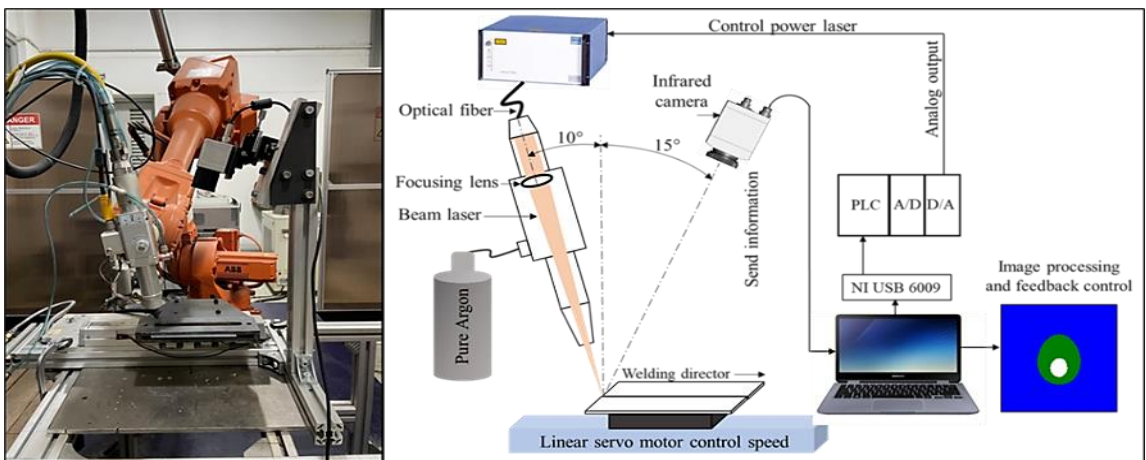
สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพของงานเชื่อมเลเซอร์แบบทันทึบนชั้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความหนาต่างกันเพื่อจำลองสถานการณ์ของความหนาที่เปลี่ยนไประหว่าง 0.5 ถึง 1.0 มม. ด้วยวิธีการประมวลผลภาพบริเวณบ่อหลอมจากกล้องอินฟราเรดในการวิเคราะห์หาความกว้างและขนาดพื้นที่ของบ่อหลอม เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการเชื่อมเลเซอร์แบบป้อนกลับด้วยการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ โดยควบคุมแนวเชื่อมให้มีความคงที่ (Uniform Weld Bead) มากที่สุดและมีการซึมลึกสมบูรณ์ (Full Penetration)

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

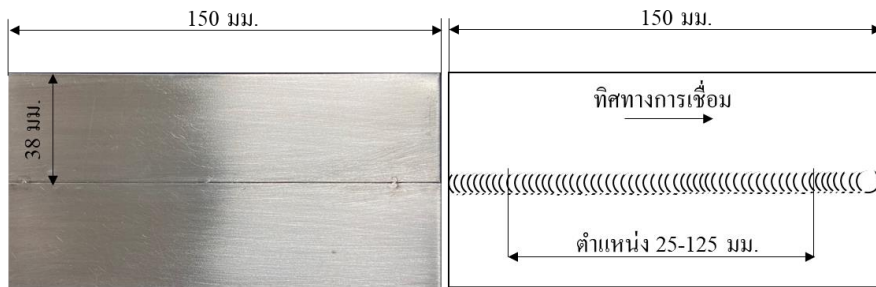
### 2.1 การติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย โดยใช้ไฟเบอร์เลเซอร์รุ่น JenLas CW500 มีกำลังวัตต์สูงสุด 500 วัตต์ เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

JIS G3101 SS400 ความหนา 0.5-1.0 มม. รอยต่อชนท่าราบ (Butt Joint in Flat Position) ความเร็วในการเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ใช้อาร์กอน 99.99 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล (Flow Rate) 5 ลิตรต่อนาที เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจน (Oxidation) ในระหว่างการเชื่อมเลเซอร์มี ระยะดีโฟกัส (Defocus) กับผิวชิ้นงาน +20 มม. และทำมุม 10 องศา เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับไปยังเลเซอร์ ติดตั้งกล้องอินฟราเรดรุ่น Optris PI1M ห่างจากชิ้นงาน 300 มม. ทำมุม 15 องศา เพื่อรับภาพขณะเชื่อมเลเซอร์ โดยตั้งค่านับทิก 10 เฟรมต่อวินาที มีการสอบเทียบขนาดของภาพการสอบเทียบและสัดส่วนที่ผิดเพี้ยน (Calibrate and Distortion) ที่แท้จริงโดยสอบเทียบในโปรแกรม Lab VIEW จากการวัดขนาดตารางที่ทราบขนาดจริงคือ 38 x 150 มม. นอกจากนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่คงที่ของการทดลองตอนเริ่มและตอนจบของการเชื่อมจึงวิเคราะห์ผลการทดลองช่วงระยะแนวเชื่อม 25-125 มม. ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับงานเชื่อมไฟเบอร์เลเซอร์



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ใช้สำหรับการวัดผลเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล

### 3. การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับและการจำแนกพารามิเตอร์ของบ่อหลอม

#### 3.1 การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับ

รูปที่ 3 แสดงการควบคุมแบบพีไอดี ของระบบ โดยการปรับหาค่าความไว (Gain)  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ที่เหมาะสมความหนาขึ้นงานนั้นๆ ด้วยหลักการของซีกเกลดอร์-นิโคลส์ [9] ส่วนรูปที่ 4 แสดงไดอะแกรมการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ (Adaptive PID) โดยเทคนิคดังกล่าวระบบควบคุมจะสามารถปรับค่าความไวได้เองแบบอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้จากการพิจารณาค่าความผิดพลาด (Error) เทคนิคดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อลดค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Steady State Errors) และช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ของระบบ โดยการควบคุมจะเปรียบเทียบกับจุดตั้งค่า (Set Point) กับค่าความผิดพลาด (Error) ความแตกต่างของสัญญาณในกรณีนี้ (ค่าความกว้างของภาพบ่อหลอม) ถูกนำมาคำนวณเพื่อใช้ในการควบคุมค่ากำลังวัตต์ของเลเซอร์ โดยการตอบสนองของข้อมูลอยู่ที่ 10 Hz โดยความแตกต่างของการควบคุมแบบพีไอดีกับการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้นั้นถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพของการควบคุมและความคงที่ของแนวเชื่อม (Uniform Weld Bead)

#### 3.2 การจำแนกพารามิเตอร์ของบ่อหลอม

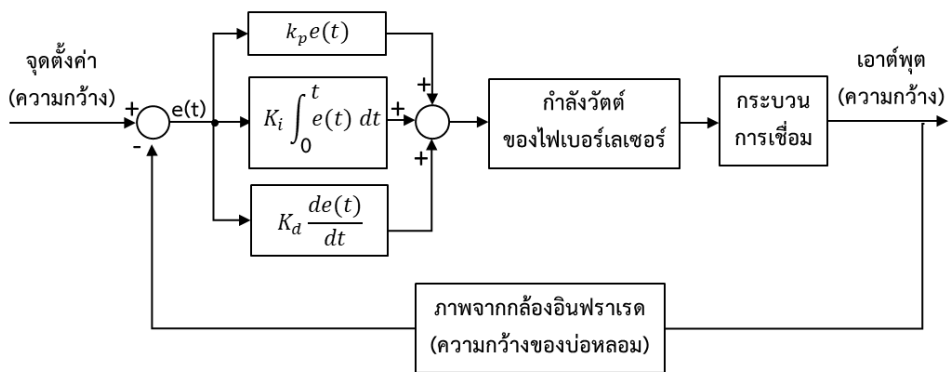
ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นพิจารณาบริเวณบ่อหลอมและคีย์โฮลด์ (Key Hole) ดังแสดงใน รูปที่ 5 (ข) โดยการตั้งค่าอุณหภูมิสำหรับแสดงรูปบ่อหลอมละลายที่สนใจในช่วง 900 - 1400 องศาเซลเซียส โดยเป็นการปรับตั้งตามผลที่เกิดระหว่างการทดลองซึ่งมีค่าความผิดพลาด (Error) น้อยและช่วยให้การนำภาพไปประมวลผลได้มีประสิทธิภาพดี ทั้งนี้ค่าเกณฑ์อุณหภูมิที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อม กำลังวัตต์ของเลเซอร์วัสดุและความหนาของวัสดุที่ใช้ ในที่นี้ได้ตั้งค่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเพื่อใช้เป็นตัวแทนของช่วงการเกิดผลกระทบจากความร้อนจากผลการเชื่อมจำแนกด้วยสมการที่ (1) และทำการวิเคราะห์ภาพในเชิงตัวแปรนำเข้าของข้อมูลภาพต้นฉบับ ซึ่งมีการรับภาพมาจากกล้องถ่ายภาพมาจากซอฟต์แวร์ของ Optris PIX Connect และมีเพื่อตั้งค่ารูปแบบของอุณหภูมิและกำหนดสีในภาพเพื่อเป็นตัวแปรนำเข้าสำหรับป้อนเข้าสู่ระบบ เพื่อวัดความกว้างของระยะทางระหว่างขอบของภาพที่ตรวจพบในทิศทางเดียวกันภายในบริเวณสี่เหลี่ยมที่กำหนด (Clamp) ด้วยฟังก์ชันใน Ni Vision และวัดค่าลักษณะของวัตถุ (Particle Measurement)



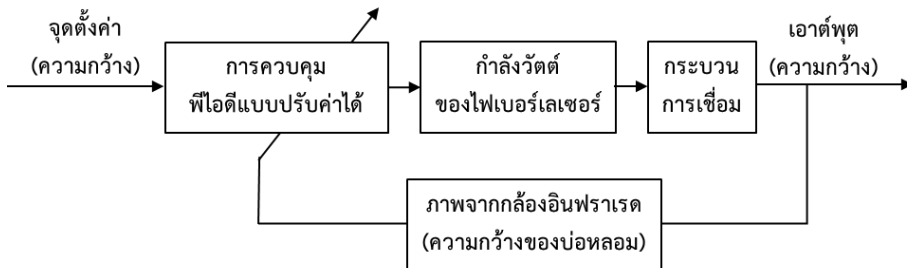
ซึ่งคือกลุ่มของพิกเซลที่อยู่ติดกันในภาพสองระดับสีที่นำมาใช้ในการบ่งบอกคุณสมบัติของพื้นที่ของบ่อหลอม ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) โดยมีขั้นตอนการประมวลผลภาพแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อต้นแบบของภาพอุณหภูมิที่วัดได้ถูกนำมาสอบเทียบด้วยความบิดเบี้ยวของภาพโดยใช้ข้อมูลชุดจุดสมนัยกัน (Point Coordinates Calibration)

จากนั้นจึงใช้ข้อมูลการกระจายตัวของฮิสโทแกรมและตัวกรองความถี่ต่ำเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของภาพในการลดสัญญาณรบกวนภายในภาพโดยไม่ทำให้ขอบวัตถุภายในภาพเบลอ ซึ่งแสดงถึงลักษณะของการปรับปรุงข้อมูลภายในภาพ หลังจากนั้นจึงทำการวัดขนาดความกว้างและพื้นที่ของบ่อหลอม

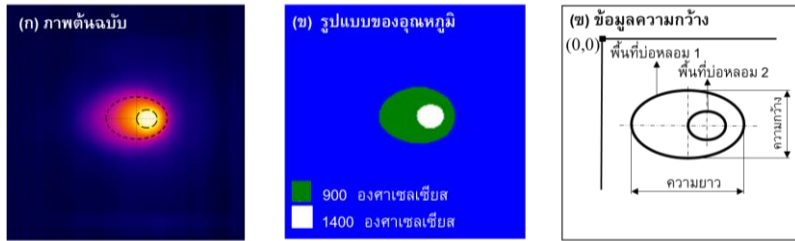
$$\text{Temperature profiles} = \begin{cases} \text{nonconsiderationzone} \leq 900 \\ \text{moltenpool} > 900 \\ \text{keyhole} > 1400 \end{cases} \quad (1)$$



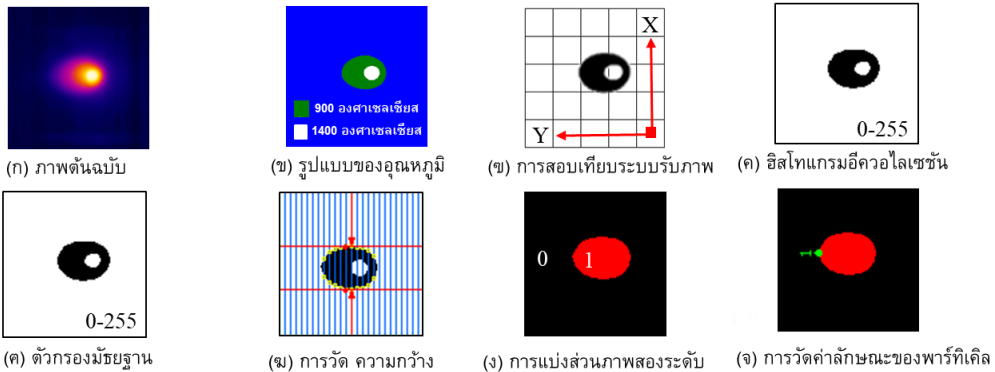
รูปที่ 3 ไดอะแกรมการควบคุมพีไอดี



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้



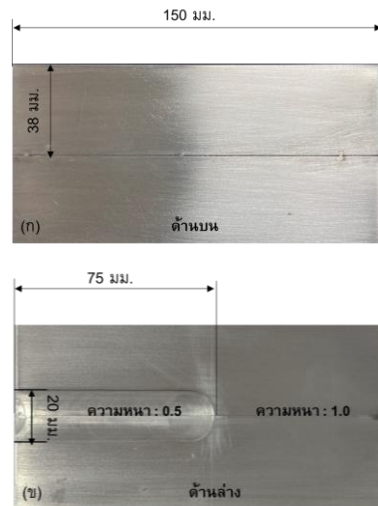
รูปที่ 5 ภาพบ่อหลอมและพารามีเตอร์ของบ่อหลอม



รูปที่ 6 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ

#### 4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ชิ้นงานที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะความหนาไม่คงที่ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงความหนาแบบขั้นบันได (ดังรูปที่ 7) โดยชิ้นงานผ่านกระบวนการกัด เพื่อใช้จำลองกระบวนการเชื่อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานที่อาจเกิดจากการออกแบบโดยตั้งใจหรือความไม่ตั้งใจของรูปลักษณะชิ้นงาน ถือว่าเป็นความท้าทายในด้านการควบคุมกำลังของไฟเบอร์เลเซอร์และเป็นการสร้างสิ่งรบกวนให้กับระบบควบคุม เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อการควบคุมและช่วยให้เข้มนักศึกษาคุณภาพของชิ้นงานที่มีความหนาแปรผันเป็นผลให้ได้งานเชื่อมที่มีคุณภาพ



รูปที่ 7 ชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาแบบขั้นบันได (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง



สำหรับการอภิปรายผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อได้แก่หัวข้อ 4.1) การควบคุมแบบวงเปิด (No Feedback Control) เพื่อหาจุดตั้งค่า (Set Point) กรณีความหนาชิ้นงานคงที่ โดยการใช้ความหนาคงที่ 0.5 0.8 และ 1.0 มม. กำลังวัตต์ 100-500 วัตต์ โดยใช้ช่วงกำลังวัตต์ต่างกันครั้งละ 100 วัตต์ เพื่อหา กำลังวัตต์ที่เหมาะสมของแต่ละความหนาโดยการพิจารณาความคงที่ของแนวเชื่อมและการหลอมลึก (Full penetration) หลังจากนั้นจึงหาค่าความกว้างของบ่อหลอมที่เหมาะสมไปตั้งเป็นค่าจุดตั้งค่า (Setpoint) สำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี (PID Feedback Control) ในหัวข้อ 4.2) กรณีความหนาชิ้นงานคงที่ โดยการใช้ความหนาคงที่ 0.5 0.8 และ 1.0 มม. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแนวเชื่อมเมื่อใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบ (PID) ซึ่งนำไปใช้ในหัวข้อ 4.3) การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี (PID Feedback Control) กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาจาก 1.0 เป็น 0.5 มม. (1.0-0.5 มม.) และความหนาจาก 0.5 มม. เปลี่ยนแปลงไปเป็น 1.0 มม. (0.5-1.0 มม.) เพื่อทดสอบพฤติกรรมระหว่างเชื่อมที่มีความหนาไม่คงที่ นอกจากนั้นมีการเปรียบเทียบการควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าได้ของอัตราขยาย  $K_i$  (Adaptive PID) ในหัวข้อ 4.4) กรณีที่ความหนาของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา เพื่อควบคุมความกว้างให้มีความคงที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานในระหว่างเส้นทางการเชื่อม

ในการศึกษานี้ ได้มีการนำค่าเฉลี่ยความกว้าง (Avg. Width) มาใช้เพื่อเป็นตัวแทนความกว้างของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นในช่วงต่างๆ และยังใช้ค่าส่วน

เบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อเป็นตัวชี้วัดการแกว่งของความกว้างของแนวเชื่อม

#### 4.1 การควบคุมแบบวงเปิด No feedback control เพื่อหาค่าจุดตั้งค่า Set point กรณี ความหนาชิ้นงานคงที่

รูปที่ 8 (ก) - (ค) แสดงค่าเฉลี่ยของความกว้าง (Avg. Width) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของความหนา 0.5 0.8 และ 1.0 มม. ที่ได้จากการทดลองจากการเชื่อมที่กำลังวัตต์ต่าง ๆ และมีการแสดงผลกำลังวัตต์ต่อความกว้างแนวเชื่อมในทุกสภาวะดังรูปที่ 8 (ง) โดยเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกเฉพาะชิ้นงานที่มีการหลอมลึกสมบูรณ์เท่านั้น โดยทำการสรุปผลความกว้างแนวเชื่อมที่มีการหลอมลึกสมบูรณ์ในแต่ละความหนาที่กำลังวัตต์ต่างๆ ไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการหาขนาดความกว้างของภาพบ่อหลอม ด้วยวิธีการควบคุมแบบวงเปิด

ความหนา (มม.)	กำลัง (วัตต์)		ความกว้างแนวเชื่อม ที่หลอมลึกสมบูรณ์ (มม.)	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
0.5	200	500	5.48	9.65
0.8	300	500	5.19	6.61
1	400	500	6.75	7.31
จุดตั้งค่า (Setpoint)			5.80	

ค่าความกว้างที่ได้ ถูกนำมาหาเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนจุดเริ่มต้นที่จะมาตั้งค่าหรือเรียกว่า จุดตั้งค่า (Setpoint) ในที่ค่าที่ได้คือ 5.80 มม. และจะสัมพันธ์กับการลากเส้นเปรียบเทียบโดยจะเป็นการทำการ





ลากเส้นประ (Dash Line) ของรูปที่ 8 (ง) เพื่อให้เห็นว่าค่าดังกล่าวอยู่ในขอบเขตของที่เหมาะสมกับความหนาของชิ้นงานช่วง 0.5-1.0 มม. และใช้ค่าดังกล่าวไปตั้งเป็นจุดตั้งค่าในการควบคุมแบบป้อนกลับต่อไป

#### 4.2 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี PID Feedback control กรณีความหนาชิ้นงานคงที่

รูปที่ 9 แสดงภาพความกว้างของแนวเชื่อมที่ได้จากการควบคุมแบบพีไอดีของชิ้นงานทั้ง 3 ความหนาที่มีการนำจุดตั้งค่าที่ได้จากหัวข้อ 4.1 มาประยุกต์ใช้ ซึ่งพบว่ามีการหลอมลึกที่สมบูรณ์ทั้งหมดและแนวเชื่อมค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยรูปที่ 10 แสดงค่าความกว้างเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพของชิ้นงานทั้ง 3 ความหนา และแสดงผลเปรียบเทียบค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าที่ได้ในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของระบบเมื่อการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีทำให้มีค่า S.D. มีค่าน้อยกว่าเป็นผลให้ได้ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อมที่ดีกว่าว่าในกรณีการควบคุมแบบวงเปิดทุกกรณีและให้ค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่ามากที่สุดที่ร้อยละ 1.21 อีกทั้งระบบควบคุมมีเสถียรภาพและผลการ

ตอบสนองของเอาต์พุตเข้าสู่สถานะคงตัว โดยระบบจริงให้ผลเหมาะสมที่สุดกับงาน โดยข้อดีที่เหนือกว่าระบบการควบคุมแบบเปิดคือไม่จำเป็นต้องตั้งค่ากำลังของไฟเบอร์เลเซอร์ ระบบจะตัดสินใจจากความกว้างของภาพบ่อหลอมที่ป้อนกลับให้กับระบบควบคุมที่อ้างอิงจากจุดตั้งค่า

#### 4.3 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี PID Feedback control กรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา

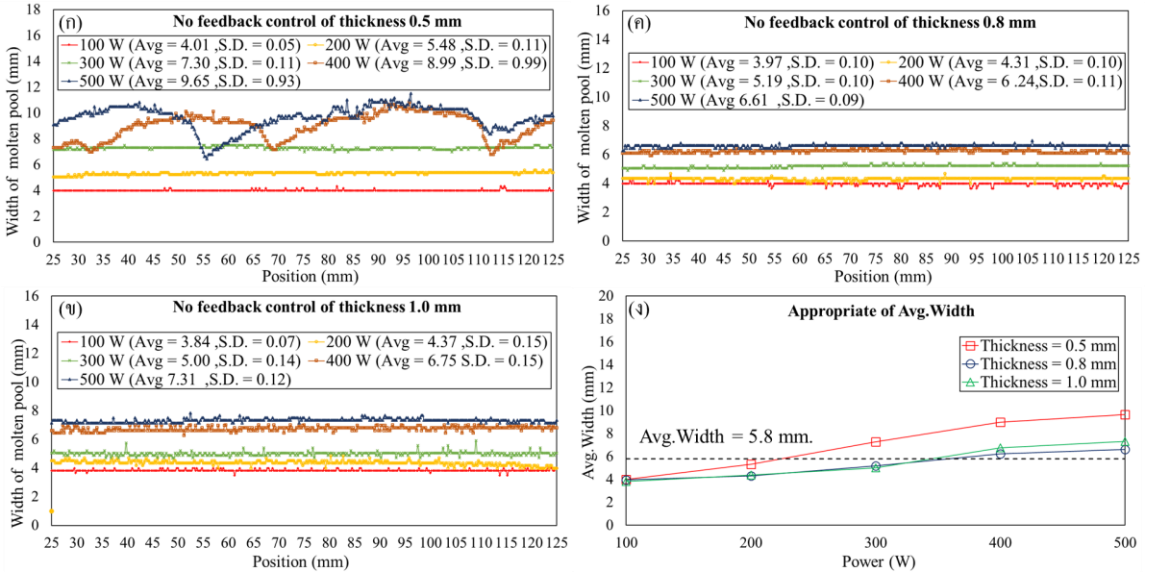
การควบคุมพีไอดีกรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาได้นำค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดลองการเชื่อมชิ้นงานแบบความหนาคงที่ในหัวข้อที่ 4.2 มาประยุกต์ เพื่อทดสอบและแก้ไขสถานการณ์ที่มีความหนาของชิ้นงานไม่คงที่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในระหว่างการเชื่อม โดยมีการทดสอบทั้งสิ้น 4 สภาวะคือ ทิศทาง 0.5 มม. ไป 1.0 มม. และ 1.0 มม. ไป 0.5 มม. ที่นำค่าอัตราขยายของความหนา 0.5 มม. และ 1.0 มม. มาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการหาขนาดความกว้างของภาพบ่อหลอมด้วยวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับกรณีความหนาคงที่

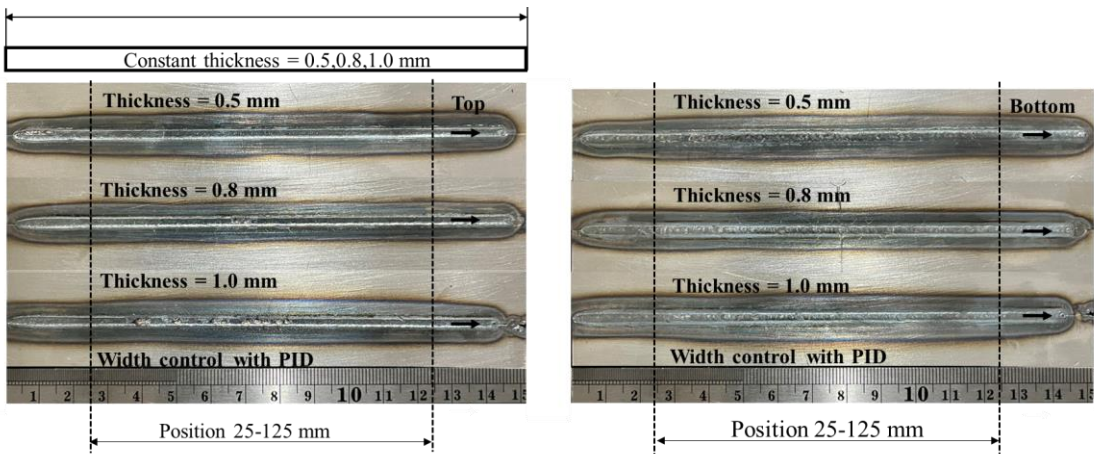
ความหนา	Avg. width	S.D.	ร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่า	กำลังขยาย
0.5	5.87	0.08	1.21	$K_p=0.5, K_i=0.045, K_d=0.5$
0.8	5.79	0.07	0.17	$K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$
1	5.75	0.06	0.86	$K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$



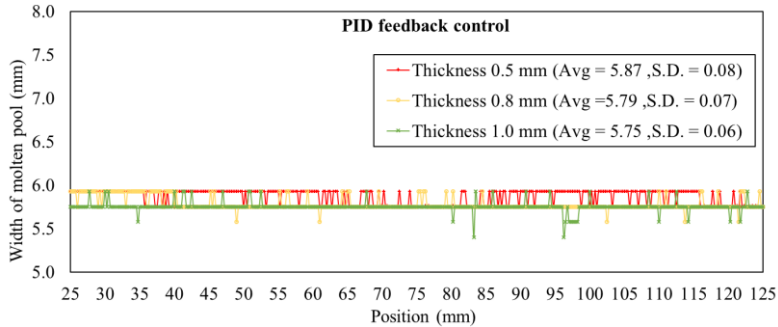
บทความวิจัย



รูปที่ 8 ความกว้างภาพพอลหลอมด้วยการควบคุมแบบวงเปิด ด้วยกำลังวัตต์ 100, 200, 300, 400 และ 500 วัตต์ (ก) งานหนา 0.5 มม. (ข) งานหนา 0.8 มม. (ค) งานหนา 1.0 มม. และ (ง) ค่าความกว้างเฉลี่ย (Avg. Width)



รูปที่ 9 ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานหนา 0.5, 0.8 และ 1.0 มม. จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดี ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม. (ซ้าย) ด้านบน (ขวา) ด้านล่าง



รูปที่ 10 ค่าความกว้างเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาคงที่

ตารางที่ 3 ผลการทดลองด้วยวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับพีไอดี กรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา

ความหนา	Avg. width	S.D.	ร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่า	กำลังขยาย
0.5 – 1.0	5.76	0.31	0.69	$K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$
1.0 – 0.5	5.87	0.36	1.21	$K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$
0.5 – 1.0	5.71	0.40	1.55	$K_p=0.5, K_i=0.045, K_d=0.5$
1.0 – 0.5	6.00	0.36	3.45	$K_p=0.5, K_i=0.045, K_d=0.5$

โดยรูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) แสดงผลของค่าเฉลี่ยความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และอัตราการใช้กำลังวัตต์โดยทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. และทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. ตามลำดับ ที่ใช้อัตราขยายของชิ้นงานความหนาคงที่ 1.0 มม. นอกจากนี้ รูปแนวเชื่อมทั้งสองทิศทางถูกแสดงไว้ในรูปที่ 12 (ก) และ 12 (ข) จากทั้งสองสภาวะให้ผลค่าเฉลี่ยความกว้างและร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่แตกต่างจากกรณีความหนาคงที่แต่ให้ผลความเบี่ยงเบน (S.D.) มีค่าสูงขึ้น (จากหัวข้อ 4.2) เมื่อพิจารณาผลความเบี่ยงเบนในช่วงความหนา 0.5 มม. พบว่าแนวเชื่อมมีลักษณะไม่คงที่มีอัตราการแกว่งที่สูงกว่าช่วงความหนา 1.0 มม. ของทั้งสองสภาวะ เนื่องด้วยค่าอัตราขยายที่นำมาใช้เหมาะกับเฉพาะช่วงความหนา 1.0 มม.

โดยรูปที่ 13 (ก) และ 13 (ข) แสดงผลของค่าเฉลี่ยความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และอัตราการใช้กำลังวัตต์โดยทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. และทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. ตามลำดับ ที่ใช้อัตราขยายของชิ้นงานความหนาคงที่ 0.5 มม. นอกจากนี้รูปแนวเชื่อมทั้งสองทิศทางถูกแสดงไว้ในรูปที่ 14 (ก) และ 14 (ข) ทั้งสองกรณี พบว่าความกว้างของแนวเชื่อมมีความคงที่ แต่เมื่อพิจารณาในช่วงเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงเป็นผลให้ความกว้างที่ได้ลดลงในกรณีทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. และความกว้างเพิ่มขึ้นในกรณีทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. อันเนื่องมาจากเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงความหนาและระบบยังไม่สามารถตอบสนององกำลังวัตต์ได้เร็วเพียงพอที่จะเข้าสู่จุดตั้งค่าและระบบใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวช้า สังเกตได้จากช่วงตำแหน่งความยาว

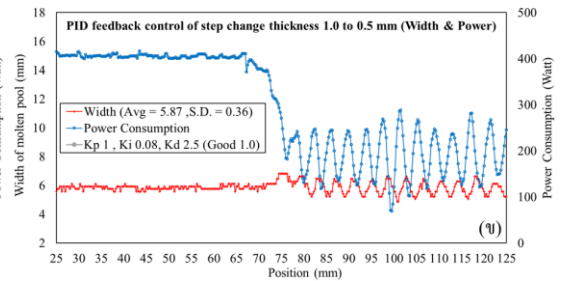
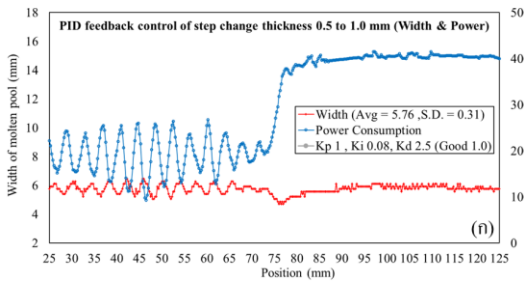


บทความวิจัย

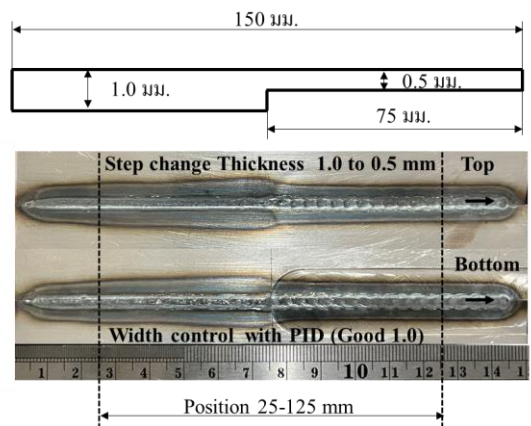
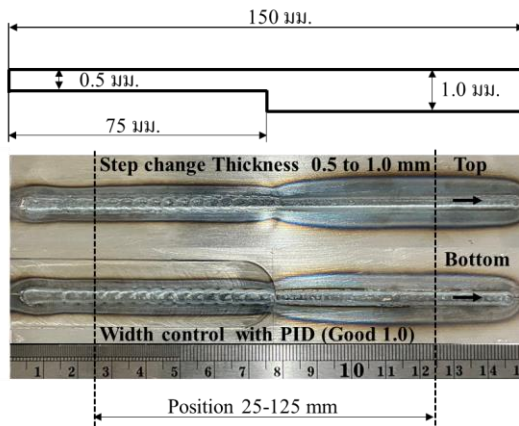
ตั้งแต่ 75 มม. ถึง 85 มม. เนื่องด้วยค่าอัตราขยายที่นำมาใช้เหมาะกับเฉพาะช่วงความหนา 0.5 มม.

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนานั้นส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของการ

ควบคุมพีไอดี ที่ใช้ความไวเพื่อเข้าหาจุดตั้งค่าจากอัตราขยายแบบคงที่เป็นอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อความคงที่ของความกว้างแนวเชื่อม



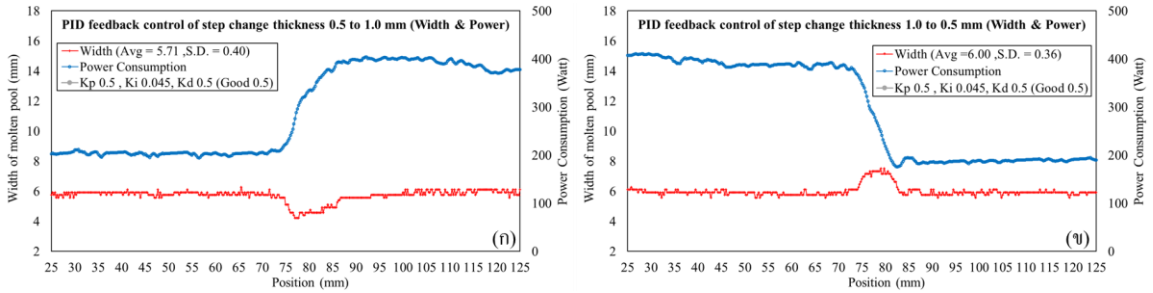
รูปที่ 11 ความกว้างเฉลี่ยกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้กำลังวัตต์ด้วยการควบคุมพีไอดี (ค่า  $K_p$  1,  $K_i$  0.08,  $K_d$  2.5) ของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา (ก) ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. (ข) ทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม.



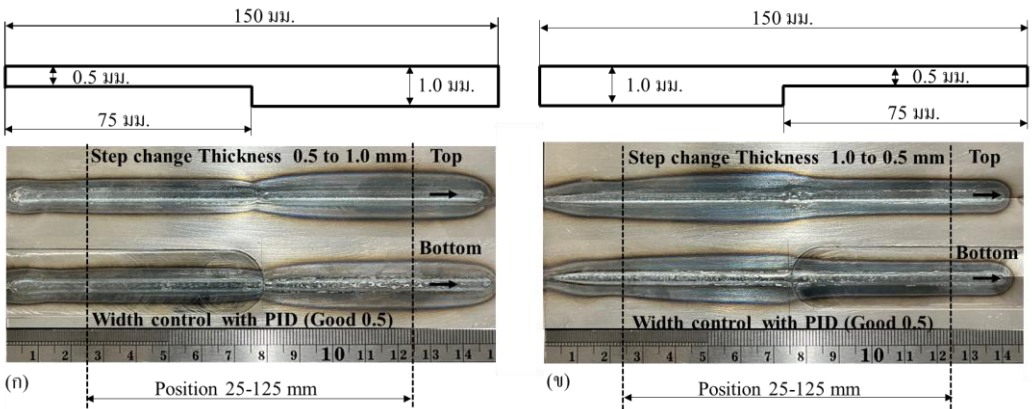
รูปที่ 12 ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดี ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม. (ค่า  $K_p$  1,  $K_i$  0.08,  $K_d$  2.5)



บทความวิจัย



**รูปที่ 13** ความกว้างเฉลี่ยกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้กำลังวัตต์ ของการควบคุมพีไอดี (ค่า  $K_p$  0.5,  $K_i$  0.045,  $K_d$  0.5) ของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา (ก) ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. (ข) ทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม.



**รูปที่ 14** ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดี ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม. (ค่า  $K_p$  0.5,  $K_i$  0.045,  $K_d$  0.5)

**4.4 การควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ของอัตราขยาย  $K_i$  Adaptive PID กรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา**

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าอัตราขยายที่เหมาะสมของการใช้งานการควบคุมพีไอดีกับระบบที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงาน ความหนาช่วง 0.5 – 1.0 มม. แสดงในตารางที่ 4 พบว่าค่า ( $K_i$ ) มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมเป็นอย่างดี

มาก โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาในระหว่างการเชื่อมเลเซอร์ หากใช้ค่า ( $K_i$ ) คงที่จะทำให้ระบบมีการตอบสนองช้ามากจึงทำให้แนวเชื่อมมีความกว้างไม่คงที่ อีกทั้งอาจทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลช้าเกินไป ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงค่า ( $K_i$ ) ควรมีการเปลี่ยนแปลงให้สอดคล้องกับความผิดพลาดของความกว้างที่ผิดเพี้ยนไปจากจุดตั้งค่าอย่างเป็นสัดส่วนในช่วงค่า ( $K$ ) ที่ยอมรับได้ของระบบโดยเรียกค่าช่วงที่ยอมรับได้นี้ว่า



ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณค่ากำลังขยาย ( $K_f$ ) โดยเป็นค่าระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ ( $K_i$ ) มากสุด ( $K_{max}$ ) กับ ( $K_i$ ) น้อยสุด ( $K_{min}$ ) โดยนำมาเทียบช่วงดังกล่าวให้เป็นสัดส่วน 100 % ดังสมการที่ 2

จากนั้นทำการนำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความกว้าง ( $\Delta W_{error}$ ) ได้จากสัดส่วนของจุดตั้งค่า ( $S$ ) ต่อค่าปัจจุบัน ( $P$ ) ได้จากสมการที่ 3

ดังนั้นสามารถหาค่า ( $K_i$ ) ที่เกิดจากความผิดพลาดของความกว้าง ( $\Delta K_{i(error)}$ ) ที่เป็นสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณค่ากำลังขยายกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความกว้างได้ดังสมการที่ 4

ทั้งนี้ค่า ( $K_i$ ) แบบปรับค่าได้ที่นำมาใช้ในระบบ ( $K_{i(Adaptive)}$ ) เกิดจากการชดเชยค่า ( $K_i$ ) ที่เกิดจาก

ความผิดพลาดของความกว้าง ( $K_i$ ) น้อยสุดที่ยอมรับได้ในระบบดังสมการที่ 5

โดยในที่นี้ได้แสดงการจำลองการคำนวณสมภาวะที่เกิดขึ้นในช่วงของค่าความกว้างปัจจุบัน ( $P$ ) และนำไปคำนวณเป็นค่า ( $K_i$ ) แบบปรับค่าได้ที่จะนำมาใช้ในระบบ ( $K_{i(Adaptive)}$ ) ในตารางที่ 5

$$K_f = \frac{K_{max} - K_{min}}{100} \tag{2}$$

$$\Delta W_{error} = \frac{S-P}{P} \times 100 \tag{3}$$

$$\Delta K_{i(error)} = \Delta W_{error} \times K_f \tag{4}$$

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

ตารางที่ 4 ช่วงค่าอัตราขยายสำหรับควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ ของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา

ค่ากำลังขยาย	$K$	$K_{max}$	$K_{min}(K_{i(0)})$	$K_f$
$K_p$	0.5	-	-	-
$K_i$	0.045-0.08	0.08	0.045	0.00035
$K_d$	0.5	-	-	-

ตารางที่ 5 แสดงการจำลองผลการคำนวณค่ากำลังขยายด้วยวิธีควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้

$K_{max}$	$K_{min}$	$S$	$P$	$K_f$	$\Delta W_{error}$	$\Delta K_{i(error)}$	$K_{i(Adaptive)}$
0.08	0.045	5.8	5.6	0.00035	3.44828	0.00121	0.04621
0.08	0.045	5.8	5.7	0.00035	1.72414	0.00060	0.04560
0.08	0.045	5.8	5.8	0.00035	0.00000	0.00000	0.04500
0.08	0.045	5.8	5.9	0.00035	-1.72414	-0.00060	0.04440
0.08	0.045	5.8	6.0	0.00035	-3.44828	-0.00121	0.04379



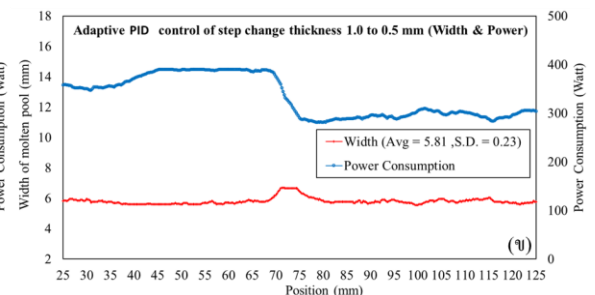
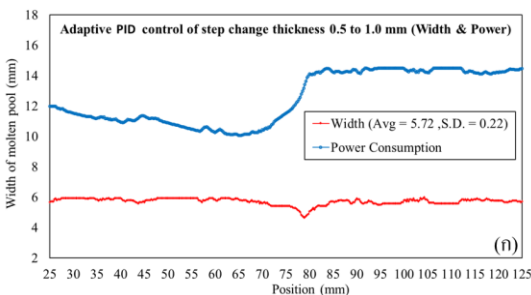
การควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ กรณีความหนา  
ชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา มีการนำมาใช้เพื่อ  
แก้ไขสถานการณ์ที่มีความหนาที่มีการเปลี่ยนแปลง  
กระทันหันของชิ้นงานที่ไม่คงที่ และเพื่อควบคุม  
ความกว้างของแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอ และช่วย  
ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบนำไปสู่การตอบสนองที่  
เร็วขึ้น ก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady-state)

รูปที่ 15 (ก) และ 15 (ข) แสดงความกว้างเฉลี่ยกับ  
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้  
กำลังวัตต์ ของการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ของ  
ชิ้นงานความหนาแบบเปลี่ยนแปลงความหนา  
ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. และ 1.0 ถึง 0.5 มม.  
ตามลำดับ และแสดงผลเปรียบเทียบในตารางที่ 6

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความกว้างเฉลี่ย  
และร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าของ  
การควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้มีค่าไม่แตกต่างจาก

ตารางที่ 6 ผลการทดลองด้วยวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ กรณีความหนาชิ้นงานแบบ  
เปลี่ยนแปลงความหนา

ความหนา	Avg. Width	S.D.	ร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่า
0.5 - 1.0	5.72	0.22	1.38
1.0 - 0.5	5.81	0.23	0.17

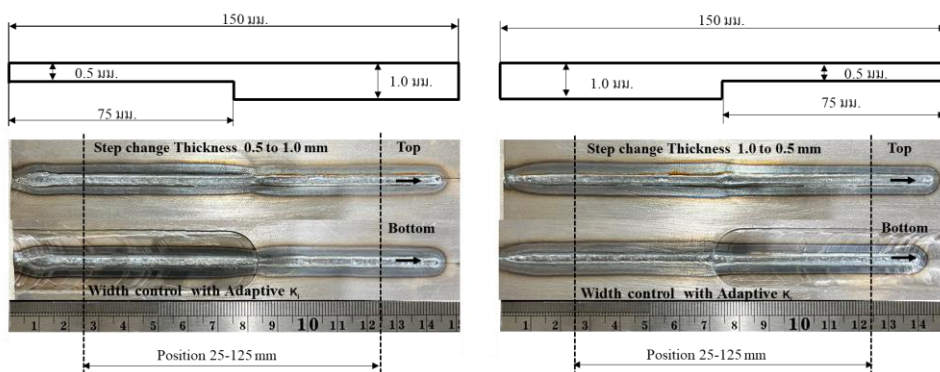


รูปที่ 15 ความกว้างเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้กำลังวัตต์ ของการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้  
ของชิ้นงานความหนาแบบการไล่ความหนา (ก)ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. (ข) ทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม.

และรักษาความกว้างแนวเชื่อมได้สม่ำเสมอกว่าแบบการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดีด้วยค่าอัตราขยายคงที่ นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังวัตต์ของกรณีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ (รูปที่ 15 (ก) และ 15 (ข)) พบว่ามีความคงที่และไม่เกิดการแกว่งของการควบคุมกำลังวัตต์ของไฟเบอร์เลเซอร์แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพของการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีแบบคงที่ ในส่วนนี้ถือว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alex Božič และคณะ [13] ที่ระบบพีไอดีใช้ร่วมกับโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันในการควบคุมกำลังของเครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบสั่งการระยะไกลโดยให้ผลกับประสิทธิภาพของระบบสั่งการและเวลาตอบสนองของสัญญาณที่ดีขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเลือกระบบป้อนกลับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมได้เป็นอย่างดี

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการเชื่อมในเงื่อนไขของความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา ระหว่างการควบคุมพีไอดี กับการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ แสดงในรูปที่ 17 (ก) และ ในรูปที่ 17 (ข) ซึ่งพบว่า

การควบคุมควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้สามารถควบคุมให้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมได้คงที่มากกว่า โดยการพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าอยู่ 0.18 และทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าอยู่ 0.13 ดังนั้นแสดงว่าการตอบสนองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Response) ของการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่า โดยีผลการตอบสนองเร็วขึ้นจนเริ่มเข้าไปอยู่ในช่วงจุดตั้งค่าของความกว้างที่กำหนด และค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำกว่าแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่ดีของการควบคุม ซึ่งผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guodong Peng และคณะ [14] ที่ใช้วิธีการควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมแบบทันทีร่วมกับและใช้การควบคุมวงปิดด้วยระบบวิทัศน์ที่สามารถรักษาความกว้างแนวเชื่อม ได้อย่างมีประสิทธิภาพและการตอบสนองที่รวดเร็วของระบบ อีกทั้งยังรักษาโอเวอร์ชูตไม่ให้มีค่าสูงเกินไปอีกด้วย

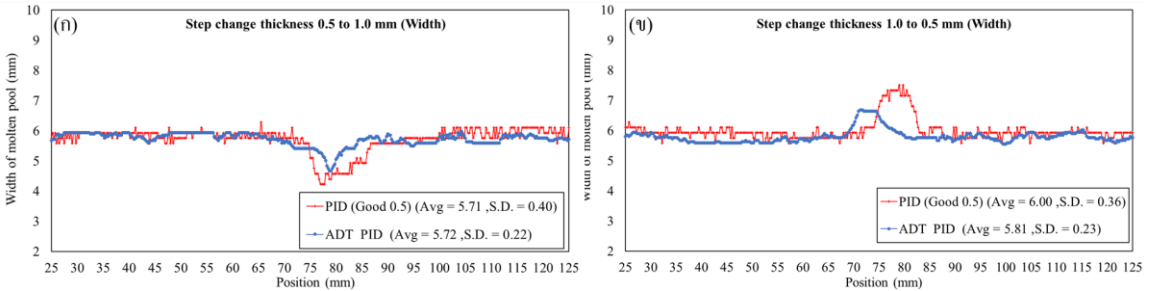


รูปที่ 16 ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานหนาแบบเปลี่ยนแปลงความหนา จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าได้ ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม





บทความวิจัย



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการเชื่อมในเงื่อนไขความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา ระหว่างการควบคุมพีไอดี กับการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้

5. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้นำเสนอการควบคุมคุณภาพรอยเชื่อมแบบทันทีของกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟเบอร์เลเซอร์ที่มีความหนาต่างกันระหว่าง 0.5 มม. ถึง 1.0 มม. โดยใช้การประมวลผลภาพอินฟราเรดในการวิเคราะห์ภาพของบ่อหลอมระหว่างกระบวนการเชื่อมและส่งข้อมูลเป็นข้อมูลนำเข้าให้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ (Adaptive PID) เพื่อควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอ (Uniform Weld Bead) จากการนำสัญญาณภาพจากกล้องอินฟราเรดเป็นตัวแปรนำเข้าหลัก และหาจุดตั้งค่าที่เหมาะสม (ในการศึกษาให้ผล 5.8 มม.) เพื่อใช้อ้างอิงเป็นจุดตั้งค่าเริ่มต้นสำหรับนำมาใช้กับระบบป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุมความกว้างของบ่อหลอม พบว่าผลการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กรณีชิ้นงานความหนาคงที่ที่ใช้การควบคุมแบบพีไอดีแบบมีจุดตั้งค่า ให้ผลของความสม่ำเสมอของความกว้างแนวเชื่อมที่ดี โดยมีค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่เกินร้อยละ 1.21

- กรณีชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาที่ควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ให้ยังให้ผลแนวเชื่อมไม่คงที่ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนานั้นส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของการควบคุมพีไอดี ที่ใช้ความไวเพื่อเข้าหาจุดตั้งค่าจากอัตราขยายแบบคงที่เป็นอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อความคงที่ของความกว้างแนวเชื่อม

- กรณีชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาที่ควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ในกรณีการปรับค่า  $K_c$  มาประยุกต์ร่วม พบว่าความกว้างของแนวเชื่อมมีความสม่ำเสมอและมีการตอบสนองเร็วขึ้น โดยผลของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของแนวเชื่อมดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี โดยให้ผลในการลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 0.18 และให้ผลร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่เกินร้อยละ 1.38 อีกทั้งให้ความแม่นยำไม่เกิน  $\pm 1.0$  มม. จากจุดตั้งค่า

- จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ยังคงรักษาคุณภาพของแนวเชื่อมในระหว่างกระบวนการได้ดีเป็นผลให้เข้าสู่สภาวะสมดุล



เร็วกว่าและรักษาความกว้างแนวเชื่อมได้สม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณากำลังวัตต์ของกรณีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้นั้น มีความคงที่และไม่เกิดการแกว่งของการควบคุมกำลังวัตต์ของไฟเบอร์เลเซอร์ แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพของการควบคุมที่ดี

นอกจากนี้ งานวิจัยในอนาคตยังสามารถนำระบบดังกล่าวไปใช้ประยุกต์กับความหนาวัสดุ งานเชื่อมที่ต่างออกไป หรือผสมผสานระบบตัดสินใจ อาทิ ตรรกศาสตร์คลุมเครือและโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีการใช้ร่วมกับการตรวจสอบคุณภาพเชิงลึกในดำเนินงานเชื่อม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ Center of Innovation in Design and Engineering for Manufacturing (CoI-DEM), KMUTNB” ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการเชื่อมเลเซอร์และแขนกล

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.Y. You, X.D Gao and S. Katayama, Review of laser welding monitoring, Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(3), 181-201.
- [2] J. Stavridis, A. Papacharalampopoulos and P. Stavropoulos, Quality assessment in laser welding: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, 1825-1847.

- [3] W. Huang, and R. Kovacevic, Feasibility study of using acoustic signals for online monitoring of the depth of weld in the laser welding of high-strength steels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(4), 343-361.
- [4] W. Meng, X. Yin, J. Fang, L. Guo, Q. Ma and Z. Li, Dynamic features of plasma plume and molten pool in laser lap welding based on image monitoring and processing techniques, Optics and Laser Technology, 2019, 109, 168-177.
- [5] A.R. Konuk, R.G. Aarts, A.J. Huis, T. Sibillano, D. Rizzi and A. Ancona, Process control of stainless steel laser welding using an optical spectroscopic sensor, Physics Procedia, 2011, 12, 744-751.
- [6] M. Xia, E. Biro, Z. Tian and Y.N. Zhou, Effects of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels, ISIJ international, 2008, 48(6), 809-814.
- [7] M. Xia, Z. Tian, L. Zhao, and Y.N. Zhou, Fusion zone microstructure evolution of Al-alloyed TRIP steel in diode laser welding, Materials transactions, 2008, 49(4), 746-753.



- [8] Z. Gu, S. Yu, L. Han, X. Li, and H. Xu, Influence of welding speed on microstructures and properties of ultra-high strength steel sheets in laser welding, *ISIJ international*, 2012, 52(3), 483-487.
- [9] M. Kushwah, and A. Patra, PID controller tuning using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor, *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 2014, 3(13), 2924-2929.
- [10] B. Kaewprachum, and P. Srisungsitthisunti, Real-time process monitoring of laser welding by infrared camera and image processing, *Key Engineering Materials*, 2020, 856, 160-168.
- [11] Y.W. Huang, P.C. Tung and C.Y. Wu, Tuning PID control of an automatic arc welding system using a SMAW process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34, 56-61.
- [12] W. Mao, S. Li, P. Liu and J. Xue, Study on double-pulse welding process of aluminum alloy based on fuzzy self-tuning of PID parameters, *12<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Proceeding, 2020, 1, 167-170.
- [13] A. Božič, M. Kos and M. Jezeršek, Power control during remote laser welding using a convolutional neural network, *Sensors*, 2020, 20(22), 6658.
- [14] G. Peng, B. Chang, G. Wang, Y.Gao, R. Hou, S. Wang and D. Du, Vision sensing and feedback control of weld penetration in helium arc welding process, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 72, 168-178.