

ผลกระทบของตัวแปรการเชื่อมต่อการหลอมละลายลึกของการเชื่อมฟลักซ์คอร์เหล็กกล้า  
ความแข็งแรงสูงต่อฉากสำหรับงานเครื่องจักรกลหนัก

The Effect of Process Parameter on Penetration in FCAW of Fillet Joint High  
Strength Steel for Heavy Equipment

ณัฐ แก้วสกุล<sup>1\*</sup> สุภารัตน์ บุตรไชย<sup>1</sup> อัญญารัตน์ สอนสนาม<sup>1</sup> ภาวินี อ่างบุญตา<sup>1</sup> และ ธวัชชัย คำแดง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Nut Kaewsakul<sup>1\*</sup> Suparat Bootchai<sup>2</sup> Anyarat Sonsanam<sup>3</sup> Parvinee Angboonta<sup>4</sup> and Thawattchai Chomdeng<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Division of Industrial Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Thunyaburi, Thunyaburi District, Pathum Thani Province

\*Corresponding author Email: nut\_k@rmutt.ac.th

(Received: December 6, 2024; Revise: December 31, 2024; Accepted: December 31, 2024)

#### บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรการเชื่อมต่อการหลอมละลายลึกของการเชื่อม ฟลักซ์คอร์เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงต่อฉากสำหรับงานเครื่องจักรกลหนัก ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมต่อการหลอมละลายลึกของชิ้นงานเชื่อมต่อฉากที่ได้จากการปรับตั้งตัวแปรการเชื่อมที่แตกต่างกันได้แก่ กระแสไฟเชื่อม แรงดันอาร์ก และชนิดของแก๊สคลุมวิธีการทดลองเตรียมชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ขนาด 100 x 380 x 10 มิลลิเมตร เลือกใช้ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ (E111T1-GC H4) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๑.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความเร็วในการเชื่อม 15 เซนติเมตรต่ออนาที ระยะเยื้องลวดเชื่อม 18 มิลลิเมตร โดยกำหนดสภาวะการเชื่อมกระแสไฟเชื่อมที่ 160 180 และ 200 แอมแปร์ตามลำดับ แรงดันอาร์ก 200 180 และ 22 โวลต์ ชนิดของแก๊สคลุมอาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ และอาร์กอนผสมคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้กระแสไฟเชื่อม และแรงดันอาร์กที่เพิ่มขึ้นทำให้การหลอมละลายลึกเพิ่มสูงขึ้นด้วยไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบ หรือท่าระดัด หรือใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สผสมอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีสภาวะการเชื่อมที่ให้การหลอมละลายลึกมากที่สุดคือ การเชื่อมด้วยกระแสไฟ 200 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 24 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 15 เซนติเมตรต่ออนาที แก๊สคลุมอาร์กอนผสมคาร์บอนไดออกไซด์ ลักษณะหรือรูปลักษณ์ของแนวเชื่อม (Weld Profile) ที่เหมาะสมได้แก่การหลอมละลายลึก ความสมมาตรของแนวเชื่อมต่อฉาก ความนูนของแนวเชื่อมได้รับจากสภาวะการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 200 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 24 โวลต์ ใช้แก๊สปกคลุมชนิดอาร์กอนผสมคาร์บอนไดออกไซด์ ตำแหน่งท่าราบจะสร้างบ่อหลอมของแนวเชื่อมได้อย่างสมมาตร และสร้างขอบขาของแนวเชื่อมหลอมละลายอย่างสมบูรณ์สูงสุด

**คำสำคัญ:** การเชื่อมฟลักซ์คอร์ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง การหลอมลึก และแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

## Abstract

This research study aims to find the weld penetration of Flux Core Arc Welding (FCAW) of Quenched and Tempered High Strength Steel for heavy equipment. To study the effect of welding condition as the welding current, arc volt and gas shielding with flux core arc welding process. By determined the welding current 160, 180 and 200 Amp and arc voltage 20, 22, 24 V respectively. Welding on flat and horizontal position with Argon, Carbon dioxide and Argon mixed Carbon dioxide shielding gas. To compare the welding penetration, relate with the welding current, arc voltage and gas shielding by inspection of weld quality as weld profile, penetration, width of weld and compare the mechanical test with microstructure. The experimental procedure preparation of base metal is quench and tempered high strength steel has the dimension of width 100 mm long 300 mm and thickness 10 mm. Use the solid wire electrode flux core wire E111T1-GC H4 diameter 1.2 mm. Welding speed 15 cm/min, electrode extension 18 mm. The result shows the highest weld penetration occurs from the high welding current of 200 Ampere, 24 Voltage and gas mixed between Ar and CO<sub>2</sub> with flat welding position. In the welding condition produce the weld profile are symmetry the leg of weld is flat with the surface of fillet base metal is show the excellent of penetration of weld metal with base metal. The macrostructure shows the leg penetration are excellent.

**Key Word:** Weld Penetration, High Strength Steel, Penetration, Welding Microstructure and Gas Shielding

## 1. บทนำ

เทคโนโลยีการเชื่อมต่อประกอบโลหะในปัจจุบันได้รับความนิยมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมต่อประกอบชิ้นงาน (Base Metal) เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นในการเชื่อมต่อประกอบประหยัดเวลา ขึ้นรูปได้ง่าย สิ่งสำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งคือการพิจารณาเลือกโลหะชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง ๆ เพื่อจะลดน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้าง จึงทำให้หลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตอะไหล่ชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมการต่อเรือเดินสมุทร อุตสาหกรรมการเชื่อมต่อประกอบโครงสร้างเหล็กอาคารสูง, สะพาน โรงงาน อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลหนัก ได้แก่ รถเครน รถแทรกเตอร์ รถสำหรับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ รวมถึงอุตสาหกรรมการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนหรือภาชนะบรรจุแรงดันสูง (Pressure Part) อุตสาหกรรมการเชื่อมต่อประกอบระบบท่อส่งน้ำมัน ระบบท่อส่งก๊าซ การเชื่อมประกอบโรงแยกก๊าซ การเชื่อมประกอบทุ่นลอยหรือฐานเจาะน้ำมัน (Off Shore Construction) การเชื่อมประกอบถังสำรองเชื้อเพลิงที่มีแรงดันสูง (Pressure Vessel) จากความต้องการที่หลากหลายของอุตสาหกรรมการผลิตประกอบโลหะ จึงทำให้กระบวนการที่นำมาใช้ในการต่อประกอบโลหะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอย่างยิ่งกลวิธีการเชื่อมโลหะที่มีอยู่อย่างมากมาย หลากหลายวิธีได้ถูกนำมาทำการการศึกษารายละเอียดอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อมโลหะประเภทต่าง ๆ ตัวแปรของกระบวนการเชื่อมที่มีผลต่อชิ้นงานเชื่อมทั้งด้านคุณลักษณะทางโลหะวิทยาของงานเชื่อม คุณสมบัติทางกล ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน รวมไปถึงด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตโดยวิธีการเชื่อมด้วยเช่นกัน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้อง สามารถตอบสนองได้ตรงตามความต้องการภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคของอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ขนาดใหญ่เช่น รถเบ็คโค รถเครน รถต่อพ่วง เป็นการนำรายได้เข้าสู่ประเทศอย่างมากมาย ทำให้เกิดการจ้างงาน สร้างรายได้ยกคุณภาพชีวิตของ

กลุ่มคนที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเหล่านี้ให้มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มผลิตภาพ (Productivity) ให้สูงขึ้นซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่นการนำเครื่องมือ เครื่องจักรสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต การเพิ่มขีดความสามารถระดับของแรงงานให้ได้มาตรฐาน สามารถคิดในเชิงวิเคราะห์ได้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบ วางแผนการผลิตและกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการผลิตได้อย่างถูกต้อง ที่สำคัญอย่างยิ่งคือการวิจัย และพัฒนาเพื่อเพิ่มผลผลิตในสายการผลิตเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืน และสร้างรากฐานองค์ความรู้ ในการพัฒนาต่อยอดผลิตภัณฑ์ก่อให้เกิดนวัตกรรมใหม่เป็นการเสริมสร้างอำนาจการแข่งขันในกลุ่มประเทศประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (AEC) ได้อย่างมั่นคง ในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ และอะไหล่ชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับงานเครื่องจักรกลหนัก ประกอบด้วยกระบวนการผลิตต่าง ๆ มากมายหลายขั้นตอน กระบวนการผลิตโดยการเชื่อมถือว่าเป็นกระบวนการผลิตขั้นต้นที่สำคัญอย่างยิ่งในการต่อประกอบชิ้นส่วนหลัก เช่น โครงสร้างหลัก ตัวถัง ชิ้นส่วนรับแรง โครงสร้างบรรทุกทุกโหลด โครงสร้างระบบส่งกำลัง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ และชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ ประกอบไปด้วยตัวแปรมากมายเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโดยการเชื่อม ตัวแปรแรกที่มีความสำคัญและถือเป็นตัวแปรต้นในงานเชื่อมได้แก่ กระบวนการเชื่อม (Welding Processes) กระบวนการเชื่อมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากที่สุดวิธีหนึ่งในกลุ่มของอุตสาหกรรมการผลิตอะไหล่ และชิ้นส่วนยานยนต์ทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ ได้แก่กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยก๊าซคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) หรือกระบวนการเชื่อมมิก (Metal Inert Gas: MIG) และกระบวนการเชื่อมที่มีวิธีการใกล้เคียงกันมาก ๆ ได้แก่ การเชื่อมแม็ก (Metal Active Gas: MAG) การเชื่อมซีโอทู (CO<sub>2</sub>) รวมถึงการเชื่อมฟลักซ์คอร์ (Flux Cored Arc Welding: FCAW)

การเชื่อมฟลักซ์คอร์เป็นวิธีการเชื่อมที่นิยมมากในการเชื่อมต่อโลหะแผ่นหนารอยต่อฉาก เช่นรอยต่อตัวที่ รอยต่อเกยเนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมที่ให้อัตราการเติมหลอดสูง สามารถเชื่อมเต็มร่องรอยบากชิ้นงานได้รวดเร็วทำให้ประหยัดเวลาและพลังงานในการเชื่อม อย่างไรก็ตามการเชื่อมฟลักซ์คอร์จำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรที่ถูกต้อง เพื่อให้กระบวนการเชื่อมสามารถสร้างการหลอมละลายลึกได้อย่างเพียงพอต่อรอยฉากซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแข็งแรงของแนวเชื่อม และคุณภาพของรอยเชื่อมที่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบเพื่อรับรองคุณภาพของงานเชื่อม ดังนั้นการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการหลอมละลายลึกของชิ้นงานเชื่อมฟลักซ์คอร์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง จะเห็นได้จากการรายงานของ E.Karadenniz et al. [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรของกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมได้แก่กระแสไฟเชื่อม อาร์คโวลต์เตจ ความเร็วในการเชื่อม ที่มีผลต่อการหลอมละลายลึก ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟในการเชื่อม และอาร์คโวลต์เตจทำให้การหลอมละลายลึกเพิ่มขึ้น การหลอมละลายลึกมากที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วในการเชื่อม 60 เซนติเมตรต่อนาที หรือจากการศึกษาของ I.S. Kim et al. [2] ได้รายงานผลการศึกษาของถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเชื่อมกับการหลอมละลายลึกของแนวเชื่อมบนแผ่นเหล็ก SS400 หนา 12.5 มิลลิเมตร พบว่ากระแสไฟในการเชื่อม อาร์คโวลต์เตจ ความเร็วในการเชื่อม มุมการเชื่อมเป็นตัวแปรที่ทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเพิ่มการหลอมละลายลึกของรอยเชื่อม หรือการศึกษาของ D. Katherrasan et al. [3] ได้รายงานผลเกี่ยวกับตัวแปรของกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์โดยกำหนดตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L(N) เช่น อัตราการป้อนหลอดเชื่อม อาร์คโวลต์เตจ ความเร็วในการเชื่อม มุมหลอดเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของรอยเชื่อมเช่น ขนาดความกว้างแนวเชื่อม ความนูนของส่วนเสริมแรง และการหลอมละลายลึกของแนวเชื่อม สามารถพยากรณ์ผลการหลอมละลายลึกสูงสุด ขนาดความกว้าง และนูนของแนวเชื่อมน้อยที่สุดได้ และพบว่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่อมีเดลด้าเพอร์ไรท์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ S. A. Mohamat et al. [4] ที่ได้รายงานผลการศึกษาการเชื่อมฟลักซ์คอร์เหล็กกล้าคาร์บอน หนา 6 มิลลิเมตร โดยการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม อาร์คโวลต์เตจ ความเร็วในการเชื่อม จากสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ กัน พบว่าการเพิ่มกระแสไฟในการเชื่อมมีอิทธิพลทำให้การ

หลอมละลายลึกเพิ่มขึ้น รวมทั้งอาร์คโวลต์เตจ และความเร็วในการเชื่อม จะเห็นได้ว่าการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมพลาสมาอาร์คโวลต์เตจที่มีผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามในการเชื่อมต่อนี้งานในอุตสาหกรรมการเชื่อมชิ้นส่วนยานยนต์ขนาดใหญ่ โดยส่วนมากแล้วการออกแบบรอยต่อนิยมใช้แบบการต่อฉาก ต่อเกย M. V. Venkatesan et al. [5] และการศึกษาวิจัยยังขาดเรื่องของกระบวนการเชื่อมพลาสมาอาร์คโวลต์เตจขึ้นงานรอยต่อฉากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ที่เป็นเครื่องจักรกลหนัก เนื่องจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสามารถรับแรงภาระโหลดได้ดีกว่าเหล็กกล้าทั่วไป อีกทั้งมีข้อได้เปรียบในการลดน้ำหนักของเครื่องจักรกลหนักได้

ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรการเชื่อมต่อการหลอมละลายลึกของการเชื่อมพลาสมาอาร์คโวลต์เตจเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงต่อฉากสำหรับงานเครื่องจักรกลหนัก จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่สำคัญยิ่งต่อการรองรับการพัฒนาของอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ และเครื่องจักรกลหนัก เนื่องจากขาดการศึกษาวิจัยที่ตรงต่อความต้องการจริงในการใช้งานของอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลหนักขนาดใหญ่ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดเลือกใช้วัสดุ การควบคุมคุณภาพการเชื่อมในกระบวนการผลิต และการถ่ายทอดองค์ความรู้ใหม่ให้แก่พนักงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องให้เกิดความพร้อมต่อการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีการเชื่อม เป็นการเพิ่มศักยภาพ และความสามารถในการแข่งขันให้แก่แรงงานในอุตสาหกรรมของประเทศต่อกลุ่มประชาคมอาเซียน (AEC) ได้เป็นอย่างดี

## 2. การดำเนินการทดลอง

### 2.1 กำหนดสภาวะการเชื่อม

กำหนดช่วงกระแสไฟเชื่อม อาร์คโวลต์เตจ ความเร็วในการเชื่อม สำหรับการเชื่อมต่อตัวที่ (Fillet Joint) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงแผ่นหนา 10 มม. ด้วยกระบวนการเชื่อมพลาสมาอาร์คโวลต์เตจ เชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องจักรกลหนัก มีความหนาไม่ต่ำกว่า 10 มม. ประกอบในลักษณะรอยต่อฉาก (Fillet Weld) เชื่อมในตำแหน่งท่าราบ ใช้กระบวนการเชื่อมพลาสมาอาร์คโวลต์เตจ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อม 1.2 มม. ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สอาร์กอน และแก๊สผสมอาร์กอน-คาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุมแนวเชื่อม เปรียบเทียบคุณลักษณะของรอยเชื่อม (Weld Profile) การหลอมละลายลึก (Penetration) ความหนาของส่วนเสริมแรง (Weld Reinforcement) และความยาวของคอปรีสิทิล (Effective Throat) อ้างอิงจากมาตรฐานการเชื่อมโครงสร้างเหล็ก AWS D1.1 โดยการกำหนดสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 ดังนี้

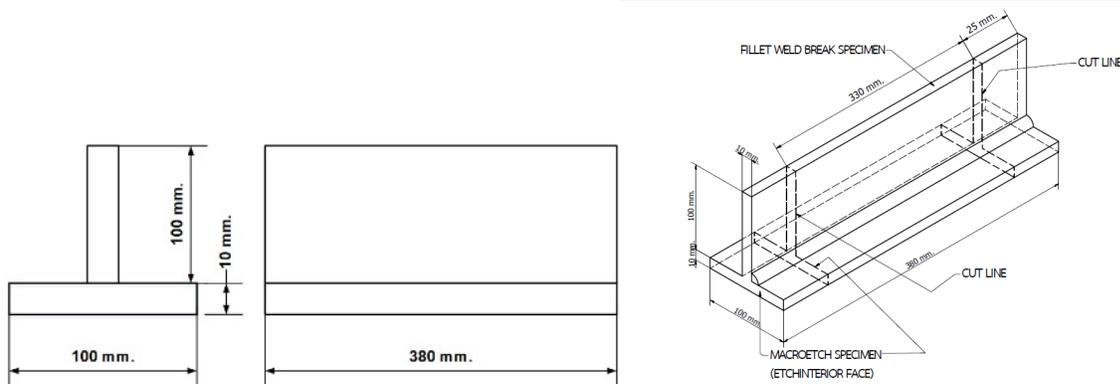
ตารางที่ 1 สภาวะการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองงานวิจัย

แก๊สที่ใช้ในการทดลองงานวิจัย	ความเร็วในการเชื่อม	ชิ้นงานเชื่อม		กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	
		กลุ่มตัวอย่าง	ทำเชื่อม		หมายเลขชิ้นงาน
CO <sub>2</sub>	- ความเร็วในการเชื่อม 15 เซนติเมตร/นาที - ระยะยื่นของลวดเชื่อม 18 มิลลิเมตร	กลุ่มที่ 1	1F	No.1	160
			1F	No.2	180
			1F	No.3	200
			2F	No.4	160
			2F	No.5	180
			2F	No.6	200

แก๊สที่ใช้ในการ ทดลองงานวิจัย	ความเร็วในการ เชื่อม	กลุ่มตัวอย่าง	ชิ้นงานเชื่อม		กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)
			ท่าเชื่อม	หมายเลขชิ้นงาน	
Ar	- ความเร็วในการ เชื่อม 15 เซนติเมตร/ นาที - ระยะยื่นของลวด เชื่อม 18 มิลลิเมตร	กลุ่มที่ 2	1F	No.7	160
			1F	No.8	180
			1F	No.9	200
			2F	No.10	160
			2F	No.11	180
			2F	No.12	200
Ar+CO <sub>2</sub>	- ความเร็วในการ เชื่อม 15 เซนติเมตร/ นาที - ระยะยื่นของลวด เชื่อม 18 มิลลิเมตร	กลุ่มที่ 3	1F	No.13	160
			1F	No.14	180
			1F	No.15	200
			2F	No.16	160
			2F	No.17	180
			2F	No.18	200

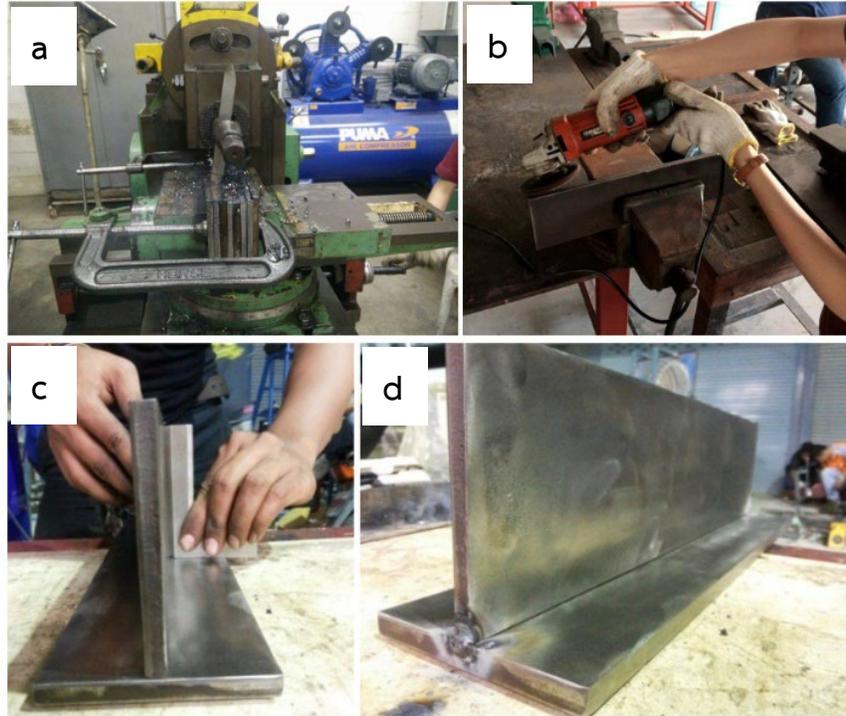
## 2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในการทดลองจะมีการออกแบบชิ้นงาน สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบในครั้งนี้ใช้มาตรฐานเกี่ยวกับการเชื่อมของอเมริกาซึ่งเป็นที่ยอมรับ (American Welding Society: AWS D 1.1 – 2020) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเตรียมประกอบชิ้นงานทดสอบ

การตัดเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบโดยการใส่ชิ้นรูปให้มีขนาด 100 x 380 มิลลิเมตร เจียรแต่งผิวชิ้นงานขจัดคราบสนิม นำชิ้นงานมาวางต่อฉาก (Fillet Joint) เพื่อเตรียมสำหรับการเชื่อมต่อฉากทำراب เมื่อเชื่อมเสร็จตัดปลายชิ้นงานด้านเริ่มต้นเชื่อมและด้านสิ้นสุดการเชื่อมออกด้านละ 1 นิ้วสำหรับการเตรียมทดสอบการแตกหักของงานเชื่อม แสดงตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการประกอบชิ้นงานก่อนการเชื่อม

รูปที่ 2 (a) ไสเตรียมขนาดชิ้นงานทดสอบ (b) การเจียรทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานก่อนการเชื่อม (c) การเตรียมประกอบชิ้นงานในรอยต่อฉาก (Fillet weld) (d) การเชื่อมยึดชิ้นงานต่อฉาก

### 2.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (High-strength low-alloy steel : HSLA Bis80) หรือเรียกว่า บิสเพลท 80 (Bisplate 80) คือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ มีความแข็งแรง ค่าแรงดึงสูงเป็น 3 เท่าของเหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กที่มีความยืดหยุ่นสูงมาก มีความสามารถในการเชื่อมขึ้นรูปที่ดี มีความหนา 10 มิลลิเมตร แล้วนำมาตัดเป็นชิ้นงานเชื่อมขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร

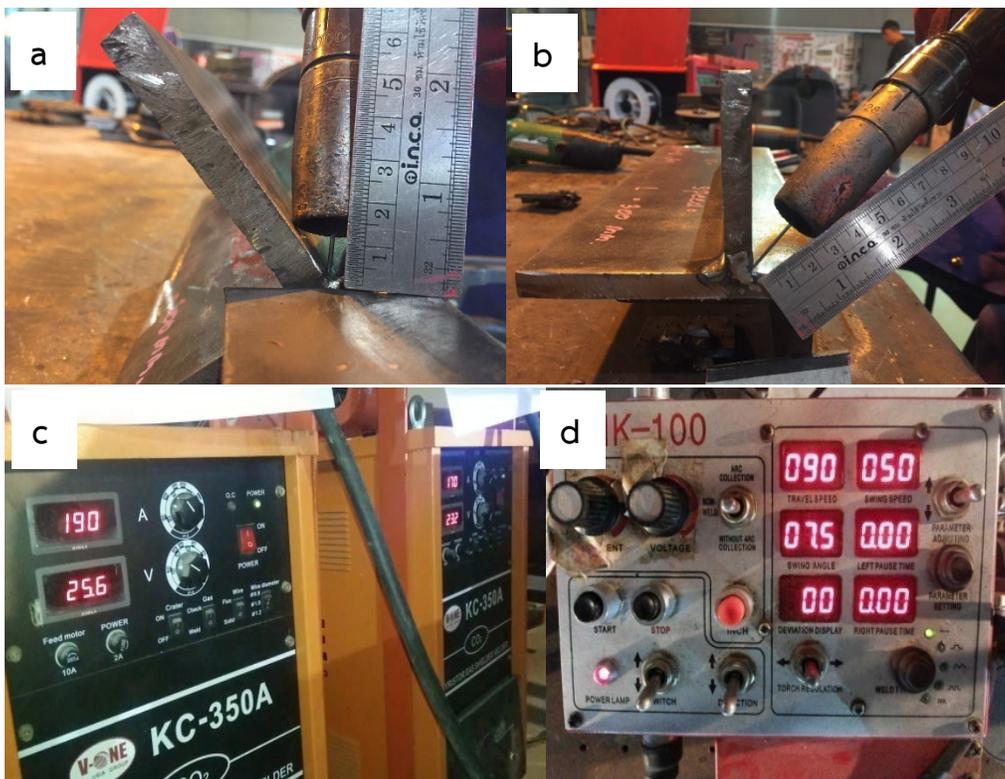
### ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (HSLA Bis80)

Properties	Specification	Typical
0.2% Proof Stress	690 MPa (Min)	750 Mpa
Tensile Strength	790 – 930 Mpa	830 Mpa
Elongation in 50mm G.L.	18% (Min)	26%
Charpy Impact (Longitudinal) – 20°C (10mm X 10mm)	40J (Min)	160J
Hardness	-	255HB

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (HSLA Bis80)

Thickness (mm)	C	P	Mn	Si	S	Cr	Mo	B	CE (IIW)	CM
5-<16	0.16	0.010	1.10	0.20	0.003	-	0.20	0.001	0.40	0.25
≥16-80	0.18	0.010	1.40	0.20	0.003	0.20	0.20	0.001	0.50	0.29
>80-100	0.16	0.010	1.15	0.20	0.003	0.90	0.20	0.001	0.58	0.30

ในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องเชื่อมมิกกี้อั้ววีวันรุ่น KC-350A และเครื่องช่วยเชื่อมมิกกี้อั้ว HUAWEI รุ่น HK-100 Auto welding machine สามารถเชื่อมโดยการป้อนลวดเชื่อมเพื่อให้เกิดการอาร์กกับชิ้นงานอัตโนมัติทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง โดยจะมีแก๊สปกคลุมป้องกันอากาศจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับบ่อหลอมละลายทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่อง เช่น รูพรุน โพรงอากาศในแนวเชื่อมได้ การเชื่อมจะใช้เครื่องช่วยเชื่อมเพื่อรักษาสถานะการเชื่อมให้คงที่ทั้งกระแสเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม ระยะห่างระหว่างหัวเชื่อมโดยมีการประกอบติดตั้งดังรูปที่ 3

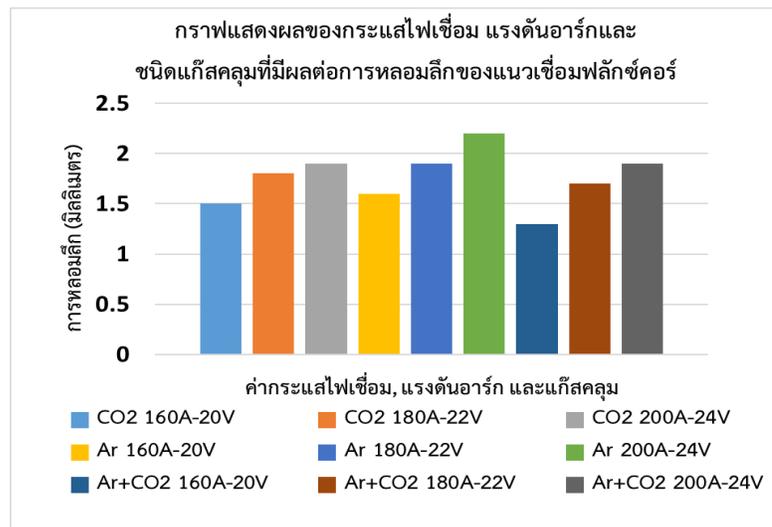


รูปที่ 3 แสดงการเตรียมการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

รูปที่ 3 (a) แสดงการเตรียมระยะยื่นลวดเชื่อมในตำแหน่งทำราบ (b) แสดงการเตรียมระยะยื่นลวดเชื่อมในตำแหน่งทำระดับ (c) เครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมพลาสมาอาร์กวีวันรุ่น KC-350A (d) เครื่องช่วยเชื่อมมิกกี้อั้ว HUAWEI รุ่น HK-100 Auto welding machine

### 3. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

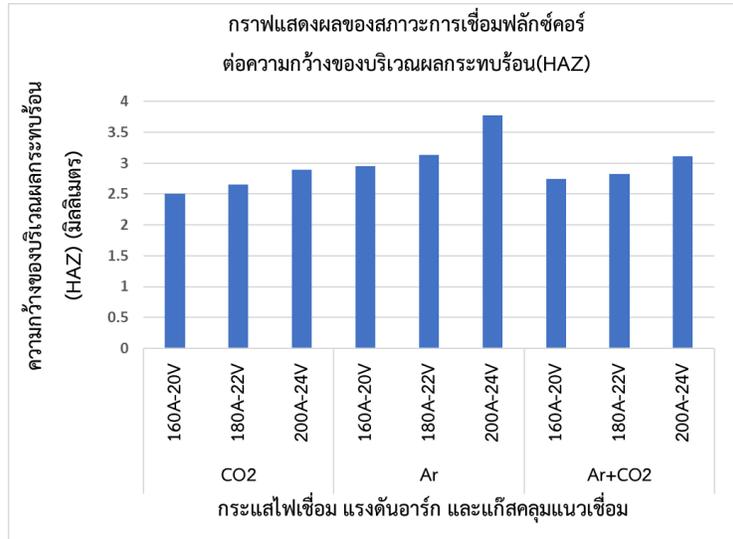
จากผลการทดลองการเชื่อมพลาสมาด้วยสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการหลอมละลายลึกของเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูงสำหรับการเชื่อมต่อประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องจักรกลหนักของรอยเชื่อมแบบต่อฉากพบว่าการเชื่อมด้วยค่า กระแสไฟเชื่อมที่สูงขึ้นในทุก ๆ ชิ้นงานทดสอบจะทำให้เกิดการหลอมละลายลึกในเนื้อของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นจากผลการทดลอง เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่ 200 แอมแปร์ จะให้การหลอมลึกในเนื้อชิ้นงานมากที่สุดคือ 2.2 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับแรงดัน อาร์กในการเชื่อมพบว่าที่ค่าแรงดันอาร์กสูงขึ้น 24 โวลต์ จะทำให้การหลอมละลายลึกเพิ่มมากขึ้นตามลำดับแสดงให้เห็นว่าการ เชื่อมที่ใช้กระแสไฟเชื่อมสูง แรงดันอาร์กสูงสามารถเพิ่มความลึกในการหลอมละลายได้ให้แก่เนื้อชิ้นงานได้ส่งผลให้สมบัติทางกล ของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นสอดคล้องกับการนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบด้วยวิธีการหักพังทลาย (Fracture Test) ปรากฏว่าชิ้นงาน ทดสอบสามารถต้านการแตกหักได้ โดยปรากฏการณ์แตกหักพังทลายบริเวณคอกของแนวเชื่อม (Throat of weld) ทดสอบนั้น แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของเนื้อแนวเชื่อมที่เกิดการหลอมละลายลึกอย่างสมบูรณ์เข้าด้วยกันบริเวณขาของแนวเชื่อม (Complete Leg Penetration) ในส่วนของแก๊สคลุมแนวเชื่อมพบว่าการใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมแนวเชื่อมทำให้เกิดการหลอม ละลายลึกสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับอาร์กอน เนื่องจาก แก๊สอาร์กอนมีคุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมในบ่อหลอมละลายได้ยาวนานกว่าแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดความร้อนสูงในบ่อหลอมละลายขอบบ่อหลอมสามารถซึมลึกเข้าไปได้ผิวเนื้อชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง เป็นการสร้างแนวขอบเขตการหลอมลึกได้ลึกมากขึ้น



รูปที่ 4 แสดงผลของการเชื่อมพลาสมาในสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการหลอมละลายลึก ของชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

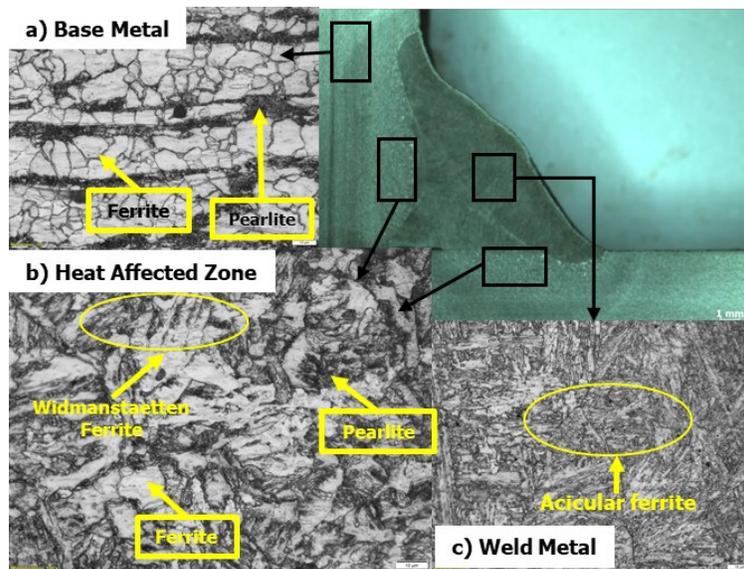
แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมในสภาวะการเชื่อมที่ใช้กระแสไฟเชื่อมสูง 200 แอมแปร์ แรงดันอาร์กสูง 24 โวลต์ และใช้แก๊ส คลุมอาร์กอนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำทำให้เกิดการสะสมของความร้อนในเนื้อชิ้นงานมากขึ้นส่งผลกระทบต่อทางโลหะวิทยาใน ชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มบริเวณผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ในการเชื่อมให้กว้าง ขึ้น จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมพบว่าพื้นที่ของบริเวณผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมมีลักษณะเกรน

หายบขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเกรนเดิมของชิ้นงาน และพื้นที่ของบริเวณผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมมีพื้นที่กว้างขึ้นเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 200 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 24 โวลต์ และใช้แก๊สคลูมอาร์กอน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงผลของสภาวะการเชื่อมที่มีผลต่อบริเวณผลกระทบร้อน

เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบค่าความแข็งปรากฏว่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณเนื้อแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อมต่ำ แรงดันอาร์กต่ำ และใช้แก๊สคลูมคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวปกป้องแนวเชื่อมทำให้การเย็นตัวของเนื้อแนวเชื่อมเร็วกว่าการใช้แก๊สคลูมอาร์กอนเนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีการนำความร้อนเร็วกว่าแก๊สอาร์กอนทำให้บริเวณเนื้อแนวเชื่อมมีความแข็งสูงสุด และค่าความแข็งจะลดลงต่ำที่สุดบริเวณผลกระทบร้อนจากการเชื่อม ส่วนบริเวณเนื้อชิ้นงานเดิมมีค่าความแข็งปานกลางเนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบใด ๆ จากความร้อนยังคงสภาพเกรนเฟอร์ไรท์ที่ละเอียดกว่าบริเวณผลกระทบร้อน



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

จากรูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคจะเห็นได้ชัดเจนว่าความร้อนจากการเชื่อมส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อชิ้นงานเดิมเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิมจากเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลท์ที่มีขนาดเกรนละเอียดเห็นขอบเกรนชัดเจนจับตัวเรียบกันเป็นกลุ่มเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลท์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนยาวตามทิศทางของการรีด เมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณผลกระทบร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างวิดแมนสแตนเทน (Widmanstatten) [6] หรือโครงสร้างเฟอร์ไรท์รูปเข็มที่มีเกรนหยาบทำให้บริเวณดังกล่าวมีความแข็งแรงลดลง ในขณะที่โครงสร้างของแนวเชื่อมที่เกิดจากการหลอมละลายจากการเชื่อมและมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วต่อเนื่องทำให้เกิดเกรนมีลักษณะเป็นเกรนแท่งยาวรูปเข็ม (Acicular Ferrite) [7] แต่มีความละเอียดกว่ามากกว่าเกรนวิดแมนสแตนเทนในบริเวณผลกระทบร้อนจึงทำให้บริเวณแนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงสูงที่สุดในชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 7 แสดงการทดสอบการพังทลายของชิ้นงานเชื่อม

เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งแรงโดยวิธีการหักพังทลาย (Fracture Test) พบว่าการแตกหักพังทลายของชิ้นงานเชื่อมจะเกิดขึ้นบริเวณคอของแนวเชื่อมเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรท์รูปเข็ม (Acicular Ferrite) [8] ที่มีลักษณะเกรนค่อนข้างละเอียดมีความแข็งแรงสูงแต่เปราะแตกหักได้ง่าย เมื่อได้รับแรงทดสอบกดอัดทำให้บริเวณเนื้อแนวเชื่อมไม่สามารถยึดตัวได้สังเกตเห็นได้จากผิวของรอยแตกไม่มีการเปลี่ยนรูป [9] หรือยึดตัวให้เห็น ลักษณะการแตกหักจะเป็นแบบเปราะผ่ากลางตลอดคอของแนวเชื่อม

จากการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมที่ใช้พลังงานสูงโดยมีสภาวะการด้วยกระแสไฟเชื่อม 200 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 24 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 15 เซนติเมตรต่อนาที ระยะยื่นปลายลวดเชื่อม 18 มิลลิเมตรชิ้นงานหนา 10 มิลลิเมตร ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอน 99.95 % ของรอยเชื่อมต่อฉาก (Fillet Weld) ทำราบ เป็นสภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าการหลอมละลายลึก (Penetration) ในเนื้อชิ้นงานเชื่อมได้มากที่สุดที่ 2.2 มิลลิเมตร การหลอมละลายลึกสมบูรณ์ทำให้ชิ้นงานเชื่อมสามารถต้านทานการแตกหักได้เป็นอย่างดีโดยไม่มีการเสียรูปแตกหักบริเวณขาของแนวเชื่อมทั้งสองด้านและให้การหลอมลึกที่รากแนวเชื่อมสมบูรณ์ด้านสมบัติทางกลความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดเมื่อเชื่อมในสภาวะที่ใช้แก๊สคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้บริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งแรงเปราะแตกหักได้ง่าย ในขณะที่การใช้แก๊สคลุมอาร์กอนทำให้เกิดการขยายพื้นที่ของบริเวณผลกระทบร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อสภาวะการเชื่อมที่ใช้พลังงานมากขึ้นและทำให้บริเวณผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งแรงลดลงต่ำที่สุดแต่มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นสามารถยึดตัวได้ดี

#### 4. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรการเชื่อมต่อการหลอมละลายลึกของการเชื่อม พลาสมาอาร์คเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงต่อฉากสำหรับงานเครื่องจักรกลหนัก เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากการสนับสนุนของคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและนักศึกษาคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมนายทรงพล ประดิษฐ์ และนายสิทธิศักดิ์ สังข์วรรณ นักศึกษาปริญญาตรีหลักสูตร 5 ปี ภาคปกติ ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทดสอบชิ้นงาน รวบรวมผลการทดสอบ และ บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญ คณาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้ผลงานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Karadeniz, U. Ozsarac, and C. Yildiz, “The Effect of Process Parameters on Penetration in Gas Metal Arc Welding Processes,” *Materials & Design*, vol. 28, no. 2, pp. 649–656, Jan. 2007. doi:10.1016/j.matdes.2005.07.014
- [2] I. S. Kim, J. S. Son, I. G. Kim, J. Y. Kim, and O. S. Kim, “A Study on Relationship Between Process Variables and Bead Penetration for Robotic Co<sub>2</sub> Arc Welding,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, no. 1–3, pp. 139–145, May 2003. doi:10.1016/s0924-0136(02)01126-3
- [3] D. Katherasan, J. V. Elias, P. Sathiya, and A. N. Haq, “Flux Cored Arc Welding Parameter Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm,” *Procedia Engineering*, vol. 38, pp. 3913–3926, 2012. doi:10.1016/j.proeng.2012.06.449
- [4] S. A. Mohamat, I. A. Ibrahim, A. Amir, and A. Ghalib, “The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) Processes on Different Parameters,” *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1497–1501, 2012. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.341
- [5] M. V. Venkatesan, N. Murugan, B. M. Prasad, and A. Manickavasagam, “Influence of FCA Welding Process Parameters on Distortion of 409m Stainless Steel for Rail Coach Building,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 20, no. 1, pp. 71–78, Jan. 2013. doi:10.1016/s1006-706x(13)60047-3
- [6] I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. G. Burov, Ya. S. Lizunkova, and E. E. Zakharevich, “Structure of Widmanstatten Crystals of Ferrite and Cementite,” *Steel in Translation*, vol. 38, no. 8, pp. 684–687, Aug. 2008. doi:10.3103/s0967091208080251
- [7] L. Cho, A. Tselikova, K. Holtgrewe, E. De Moor, R. Schmidt, and K. Findley, “Critical Assessment 42: Acicular Ferrite Formation and Its Influence on Weld Metal and Heat-Affected Zone Properties of Steels,” *Materials Science and Technology*, vol. 38, no. 17, pp. 1425–1433, Nov. 2022. doi:10.1080/02670836.2022.2088163
- [8] R. C. Cochrane, “Phase Transformations in Microalloyed High Strength Low Alloy (HSLA) Steels,” *Phase Transformations in Steels*, pp. 153–212, 2012. doi:10.1533/9780857096111.2.153

- [9] W. L. Costin, O. Lavigne, and A. Kotousov, “A Study on The Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of Acicular Ferrite and Upper Bainite,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 663, pp. 193–203, Apr. 2016. doi:10.1016/j.msea.2016.03.103