

การพัฒนาอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่ออลูมิเนียม

Development of a friction stir welding apparatus for aluminum pipe work

วรพงศ์ บุญช่วยแทน¹, ต่วนฮาร์ฟิ์ ตวนดิง¹ และ ซัยนุลอาบีดีน เจ๊ะแอ¹

Worapong Boonchouytan¹, Tuanhafit Tuanding¹ and Sainul-Abeedeen Chea-Ea¹

Received: 23 August 2024 ; Revised: 27 September 2024 ; Accepted: 1 November 2024

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อในปัจจุบัน เป็นงานที่ท้าทายความสามารถด้านการสร้างอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเฉพาะทางนี้มาก เพราะมักเกิดปัญหาได้หลายประการ เช่น การสัมผัสของเครื่องมือที่น้อยลงเนื่องจากรูปทรงที่โค้งมนของผิวงานท่อ การจัดเตรียมสำหรับการจับยึดท่อ อุปกรณ์เสริมการเชื่อมท่อ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่อ และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนทรงกระบอก ที่จะช่วยแก้ไขปัญหในการเชื่อมท่อได้ และทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพที่สูงขึ้น อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ ส่งกำลังด้วยมอเตอร์ที่ต่อเข้ากับหัวจับยึด สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที) และเครื่องกีดแนวตั้งสำหรับการจัดวางอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงาน สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที) โดยชิ้นส่วนที่สำคัญของอุปกรณ์แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักคือ ส่วนควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกีดแนวตั้ง ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม และส่วนยื่นศูนย์ท้ายแทน การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ จะใช้วัสดุท่ออลูมิเนียมเกรด 6063 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 50.80 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 38.80 มิลลิเมตร ความหนาของท่อ 6 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วหมุนเชื่อม 1 ระดับ คือ 710 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที เครื่องมือเชื่อมใช้หัวพินทรงกระบอกเกลียวหมุนขวา ระยะพิตช์ 0.8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาวของหัวพิน 4.8 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากกวน 20 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่อสามารถเชื่อมชิ้นงานท่อได้ตามวัตถุประสงค์ โครงสร้างจุลภาคเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนด้วยรูปแบบที่อิสระต่อกันซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจายของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานในเนื้อชิ้นงาน พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อมที่บริเวณแนวกวน สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 149.65 MPa และความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่แนวกวนซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 52.9 HV

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, งานท่อ, อลูมิเนียม

Abstract

The development of specialized welder for friction stir welding of pipes is challenging. This is because a number of issues, including decreased contact area resulting from pipe curvature, improper positioning of the pipe clamping device, and pipe welding accessories, etc., frequently arise during friction stir welding of pipes. Therefore, in order to address the issues with pipe welding and enhance the quality of the welds, the objectives of this study were to design and build a friction stir welder for pipes and perform performance tests. The friction stir welder

¹ หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Program in Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author: Email worapong.b@rmutsv.ac.th

developed in this study was driven by a motor held in a spindle and a vertical milling machine, which was responsible for placement of the friction welder on the bench. This friction stir welder setup contributed to automatic adjustment of welding speed (mm/min) and the rotation speed (rpm). This friction stir welder consisted of 4 main components, which were the welding speed control unit, the dividing plate mounted on the vertical milling machine, a support for the compression during welding of the specimen, and a tailstock. The performance test was conducted using aluminum alloy AA6063 pipe with an outer diameter of 50.8 mm, an inner diameter of 38.85 mm, and a thickness of 5.1 mm at one rotation speed (710 rpm) and three welding speeds (1.5, 2.5 and 3.5 rpm). The welder had a right-hand threaded cylindrical pin with a pitch of 0.8 mm, a diameter of 5 mm, a pin length of 4.8 mm, and a shoulder diameter of 20 mm. The results showed that this welder could be used in the friction stir welding of pipes as intended. The microstructural characterization revealed grain distortion due to excessive frictional heat accumulation in the specimens. The frictional stir welding at a rotation speed of 710 rpm and a welding speed of 2.5 mm/min resulted in the highest tensile strength of 149.65 MPa and the highest hardness of 52.9 HV at the Stir Zone.

Keywords: Friction stir welding, pipe work, aluminum

บทนำ

ความก้าวหน้าในการวิจัยด้านการเชื่อมวัสดุด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวของการเชื่อมวัสดุที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ และอุตสาหกรรมยานยนต์ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่ไม่ได้รับผลกระทบจากข้อจำกัดของการเชื่อมในสภาวะหลอมละลายที่เกิดจากอุณหภูมิสูง วัสดุเกรดต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างด้านสมบัติเชิงกลของวัสดุ ส่วนผสมของโลหะผสม หรือแม้กระทั่งการอบชุบด้วยความร้อนก่อนการเชื่อม ล้วนแต่อาจจะทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาค ขนาดเกรน ขอบกพร่องในรอยเชื่อม และสมบัติวัสดุที่แตกต่างกัน ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีขอบเขตการใช้งาน และต้นทุนการผลิตที่แตกต่างกัน (Suresh *et al.*, 2023)

การเชื่อมท่อโดยทั่วไปจะเชื่อมด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Na & Lee, 1996) เทคนิคการเชื่อมแบบหลอมละลายให้ความร้อนสูง ซึ่งจะทำให้เนื้อโลหะเดิมของวัสดุอ่อนตัวลง และส่งผลให้มีความแข็งแรงดิ่งน้อยลง สำหรับการเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ความร้อนที่ป้อนเข้าในกระบวนการจึงต่ำกว่าเทคนิคการเชื่อมในสภาวะหลอมละลาย วิธีนี้ช่วยลดการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุเดิม และส่งผลให้มีความแข็งแรงดิ่งของรอยเชื่อมที่มากขึ้น (Jain *et al.*, 2015) แต่การเชื่อมเสียดทานแบบกวนกับงานท่อย่อมอาจเกิดปัญหาได้หลายประการ เช่น การสัมผัสของเครื่องมือที่น้อยลงเนื่องจากรูปทรงโค้งมน การจัดเตรียมสำหรับการจับยึดท่อ อุปกรณ์เสริมเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเชื่อมท่อ เป็นต้น ใน

อดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านพยายามเชื่อมโครงสร้างท่อด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เช่น การศึกษาของ (Lammlein *et al.*, 2012) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของท่อวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6061 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 107 มิลลิเมตร ความหนา 5.1 มิลลิเมตรมีประสิทธิภาพการเชื่อมสูงสุด 70% ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,600 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 355 มิลลิเมตรต่อนาที และโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมยืนยันว่าไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม จากนั้น (Chen *et al.*, 2015) ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของท่ออลูมิเนียมร่วมกับท่อทองแดงที่มีความหนา 1.5 และ 1 มิลลิเมตร ผลการศึกษาด้านการทดสอบความแข็งแรงดิ่งและความแข็งแรง พบว่าความแข็งแรงดิ่งไม่มีรอยเชื่อมใดแตกหักจากข้อต่อรอยเชื่อมระหว่างวัสดุ Al-Cu ผลไปในทิศทางเดียวกันกับ (Hattingh *et al.*, 2016) ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่อ AA6082 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 38 มิลลิเมตร จากผลงานวิจัยพบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จำนวน 2 รอบ ไม่มีข้อบกพร่องของรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมแบบรอบเดียว นอกจากนี้ยังได้ออกแบบเครื่องมือเชื่อมที่หัวพินสามารถยึดและหดได้เพื่อจัดรูทางออกที่ส่วนปลายของท่ออีกด้วย นอกจากนี้ (Ismail *et al.*, 2016) ในการศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของท่อ พบว่าค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมจะอ่อนตัวลงมากขึ้นเมื่อใกล้กับบริเวณหัวพินของเครื่องมือเชื่อม และ (Jamshidi & Falahati, 2017) ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่อในรูปแบบเชื่อมซ้อนทับ 2 ชั้น โดยใช้เครื่องมือเชื่อมหัวพินรูปสามเหลี่ยมทรงกรวยสำหรับการเชื่อม ผลการ

วิจัยพบว่า ไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม เมื่อใช้ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อม 600 และ 800 รอบต่อนาที จากผลงานวิจัยที่นำเสนอข้างต้น พบว่า การออกแบบเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการเชื่อมท่อร่วมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งยังไม่มีความก้าวหน้าได้ศึกษาก่อน ประกอบกับการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นจุดที่น่าสนใจในงานวิจัยครั้งนี้

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของงานโครงสร้างแบบท่อมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการออกแบบตัวถังรถยนต์ที่ใช้เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยเฉพาะความท้าทายในการเชื่อมท่อสำหรับความหนาของผนังท่อที่มีความบาง และความลึกของเครื่องมือเชื่อมที่ตกลงไปในเนื้อผนังของท่อ และวัสดุรองรับในระหว่างการเชื่อม และยังรวมถึงอุปกรณ์ที่ช่วยในการเชื่อมท่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อดังกล่าวบทความนี้ นำเสนอถึงการออกแบบ พัฒนา และสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่ออลูมิเนียมสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมผสม 6063-T6 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.8 มิลลิเมตร และความหนาของท่อ 6 มิลลิเมตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่อ และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนทรงกระบอก ที่จะช่วยแก้ไขปัญหาในการเชื่อมท่อได้ และทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพที่สูงขึ้น

วิธีการวิจัย

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ
อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อส่งกำลังกับมอเตอร์ประยุกต์ใช้ร่วมกับหัวแบ่งการจับยึดท่อสามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที) และเครื่องกัดแนวตั้งสำหรับการจัดวางอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงานสามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที) โดยมีลักษณะและรายละเอียดอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ ดังนี้

1. ขนาดของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ ความกว้าง x ความยาว x ความสูง (189 x 149 x 173 มิลลิเมตร) น้ำหนัก 22 กิโลกรัม ระยะฐานถึงจุดกึ่งกลางหัวจับ 125 มิลลิเมตร สามารถปรับองศาได้ตั้งแต่ -10 ถึง 90 องศา

2. ขนาดของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม สามารถจับชิ้นงานท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 10 - 152 มิลลิเมตร

3. ความเร็วเดินเชื่อม ปรับระดับได้ตั้งแต่ 0 - 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

4. มอเตอร์เกียร์ SUNTECH ชนิด : ไฟ 1 เฟส 220 โวลต์ขนาด 1 แรงม้า โดยในการจัดวางมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์จัดให้อยู่ใกล้กัน เป็นโซนในการควบคุมและปรับความเร็วรอบให้หมุนอัตโนมัติในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยความเร็วรอบของมอเตอร์ มีความเร็วรอบสูงสุด 1420 รอบต่อนาที และสามารถส่งกำลังไปยังหัวแบ่งได้ ตามลำดับดังนี้ (1) มอเตอร์ อัตราทด 1 : 1 (2) เกียร์ทดรอบ อัตราทด 10 : 1 และ (3) หัวแบ่ง อัตราทด 40 : 1 ในส่วนของอินเวอร์เตอร์สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้น้อยที่สุด 3 รอบต่อนาที ถึงมากที่สุด 1420 รอบต่อนาทีได้ โดยอินเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้นครั้งละ 3 รอบต่อนาที (Figure 1)

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อได้นำส่วนประกอบต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ โดยติดตั้งอินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 1) เข้ากับมอเตอร์ในการปรับความเร็วให้หัวแบ่งหมุนอัตโนมัติ มีชุดจับยึดชิ้นงานท่อ (หมายเลข 2) และสามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงานท่อได้ การติดตั้งอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงานของเครื่องกัดแนวตั้ง ในขณะดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อจะมีชุดรองรับ (หมายเลข 3) เพื่อรับแรงกดในขณะเชื่อมชิ้นงาน และยื่นศูนย์ท้ายแทน (หมายเลข 4) ขณะจับยึดอลูมิเนียมในขณะเชื่อมชิ้นงาน (วรพงศ์ บุญช่วยแทน, 2567) (Figure 2)

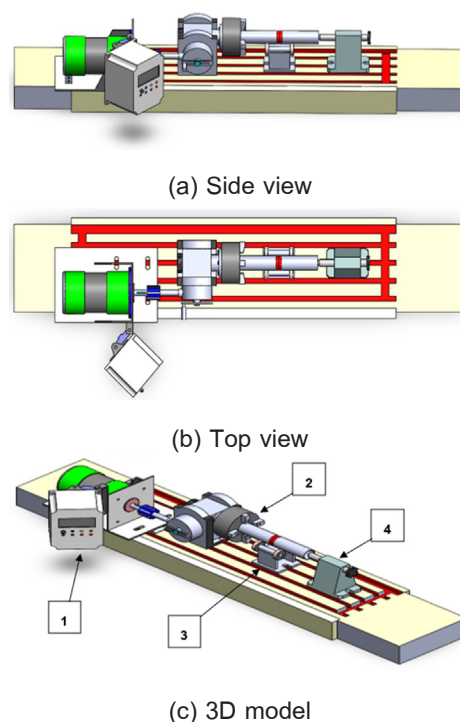


Figure 1 Schematic of friction stir welding machine for aluminum pipe work



Figure 2 Friction stir welding machine for aluminum pipe work

ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบท่อ

การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ จะใช้วัสดุท่ออลูมิเนียมเกรด 6063 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 50.80 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 38.80 มิลลิเมตร ความหนาของท่อ 6 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วหมุนเชื่อม 1 ระดับ คือ 710 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

เครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบกวน ผลิตจากเหล็ก SKD11 หัวพินเป็นเกลียวหมุนขวา ระยะพิตช์ 0.8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาวของหัวพิน 4.8 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากกวน 20 มิลลิเมตร (Figure 3)

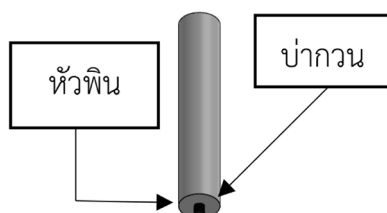


Figure 3 Welding tools

การปรับความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม โดยความเร็วหมุนเชื่อมจะปรับระดับความเร็วหมุนเชื่อมได้ตรงตามบังคับของเครื่องกวดตั้งมีหน่วยเป็น รอบต่อนาที ส่วนความเร็วเดินเชื่อมจะปรับระดับความเร็วหมุนเชื่อมได้ที่ปุ่มหมุนปรับระดับความเร็วตรงแผงควบคุมของอินเวอร์เตอร์ และกดปุ่มเปิด-ปิด การหมุนอินเวอร์เตอร์ได้ที่แผงควบคุมเช่นเดียวกัน (Figure 4)



Figure 4 Adjusting welding rotation speed and welding travel speed

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบท่อ แสดงใน Figure 5 ในทุก ๆ สภาวะการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ (ก) เปิดเครื่องกวดตั้งให้หัวพินหมุนตามเข็มนาฬิกา (ข) จากนั้นหัวพินสอดลงไปใ้เนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวพินสัมผัสกับวัสดุในระยะเวลาที่กำหนดเป็นระยะเวลา 30 วินาที เนื่องจากระยะเวลาที่กำหนดนั้น ทำให้อลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัว และสามารถไหลวนรอบ ๆ หัวพินได้สะดวกก่อนทำการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่กำหนด (ค) จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวหัวพินและปากของเครื่องมือจะทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบ ๆ หัวพิน (ง) เดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนดในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุ (จ) ทำให้เกิดรอยต่อขึ้น (ฉ) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกหัวพินออกจากรอยเชื่อม ก่อนทำการยกหัวพินควรให้การเสียดทานที่เกิดจากหัวพินคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 30 วินาที

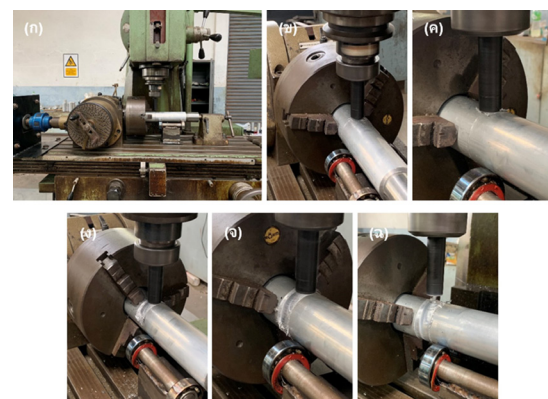


Figure 5 Friction stirring welding process for pipe

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกล

การเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกล เริ่มจากการนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วนำมาตัดตามแนวขวางกับรอยเชื่อม แสดงใน Figure 6 โดยชิ้นงานส่วนที่เป็นส่วนจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดแนวเชื่อมจะเป็นส่วนที่ตัดทิ้งไป จากนั้นส่วนที่ติดกันจะเป็นชิ้นงานส่วนที่จะทำการตัด

เพื่อนำไปทำการทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และส่วนที่จะทำการตัดเพื่อนำไปทำการทดสอบความแข็งแรงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-B557M แสดงใน Figure 7 ซึ่งในแต่ละปัจจัยการทดลองจะดำเนินการทดสอบ 6 ชิ้น



Figure 6 Layout and cutting of the workpiece

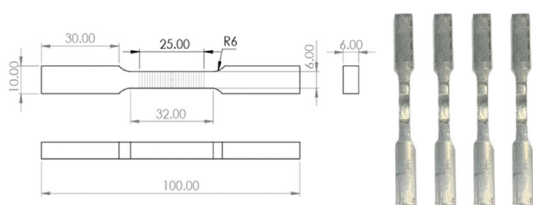


Figure 7 Tensile strength test pieces

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยชิ้นงานที่จะทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะนำไปผ่าครึ่งด้วยเลื่อยมือ พร้อมใช้น้ำหล่อเย็น จากนั้นนำไปหุ้มเรซินด้วยน้ำยาอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 320 400 600 800 1,000 และ 1,500 ตามลำดับ แล้วขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้ง โดยใช้ผงอลูมินา ขนาด 5.0 3.0 และ 0.1 ไมโครเมตร ตามลำดับ เสร็จแล้วนำไปกัดด้วยกรดคัลเลอร์ (Keller etching) เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซินเสร็จแล้วพร้อมนำส่งตรวจดูโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคต่อไป (Figure 8)



Figure 8 Cross section specimen ready for inspection

การทดสอบความแข็งใช้ชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาคมาแล้วใช้ในการทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers) กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างรอยกด 500 ไมโครเมตร แรงที่ใช้กด 100 กิโลกรัมแรง เป็นเวลา 10 วินาที ทั้งหมด 3 แถว แถวละ 16 จุด (Figure 9)

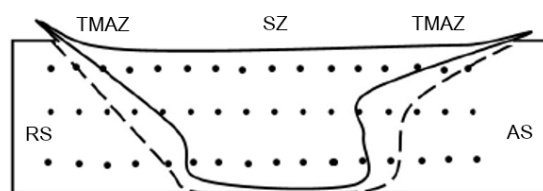


Figure 9 The weld surface area tested for hardness

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ

จากการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ ผู้วิจัยได้อธิบายส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของอุปกรณ์เชื่อม โดยชิ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องจักรออกเป็น 4 ส่วนหลักคือ ส่วนสำหรับควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกัดแนวตั้ง ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม และส่วนยืนศูนย์ท้ายแท่น ประกอบด้วยดังต่อไปนี้

ส่วนสำหรับควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ขนาดฐานยึดมอเตอร์ของอุปกรณ์เชื่อม 300 x 450 มิลลิเมตร ความเร็วรอบมอเตอร์ปรับได้ตั้งแต่ 3 รอบต่อนาที ถึง 1420 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถทดสอบความเร็วรอบได้เป็นความเร็วเดินเชื่อมตั้งแต่ 0 ถึง 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 10) ซึ่งสามารถสรุปค่าความเร็วรอบที่ใช้ได้ แสดงดัง Table 1



Figure 10 Layout of the welding speed control unit of the equipment

Table 1 Performance of friction welding equipment

No	Motor speed (rpm)	Welding speed (mm/min)
1	100	0.25
2	200	0.50
3	300	0.75
4	400	1.00
5	500	1.25
6	600	1.50
7	700	1.75
8	800	2.00
9	900	2.25
10	1000	2.50
11	1100	2.75
12	1200	3.00
13	1300	3.25
14	1400	3.50
15	1420	3.55

ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกัดแนวตั้ง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์หัวแบ่ง ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมเสียดทานวัสดุงานท่อ โดยขับหัวแบ่งหมุนอัตโนมัติของชิ้นงานเชื่อม สามารถจับชิ้นงานได้ทั้งเพลาดันและเพลากลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานสูงสุด 152 มิลลิเมตร สำหรับเพลาดัน ชิ้นงานสูงสุด 256 มิลลิเมตร สำหรับเพลากลวง ปรับองศาของหัวแบ่งได้ตั้งแต่ -10 ถึง 90 องศา (Figure 11)

**Figure 11** Equipment for holding pipe workpieces

ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม เป็นส่วนที่ช่วยรองรับแรงกดจากเครื่องมือเชื่อมที่หมุนวนส่งกำลังมาจากเครื่องกัดแนวตั้งในขณะที่เชื่อมชิ้นงาน ลูกกลิ้งจะช่วยให้การหมุนเคลื่อนที่ของชิ้นงานให้ได้จุดศูนย์กลางตลอดแนวเชื่อม โดยการออกแบบและสร้างให้สามารถรองรับวัสดุทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 50.8 – 100 มิลลิเมตร (Figure 12)

**Figure 12** Support roller

ส่วนยืนศูนย์ท้ายแทน ใช้ยืนศูนย์ชิ้นงานเชื่อม โดยจับชิ้นงานด้วยสามจับพื้นพร้อมด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งยืนศูนย์ให้แน่นด้วยมือหมุนซึ่งสามารถหมุนปรับเลื่อนเข้าและออกได้ตามขนาดความยาวของชิ้นงานเชื่อม สามารถยืนศูนย์ชิ้นงานได้ทั้งเพลาดันและเพลากลวง (Figure 13)

จุดเด่น สามารถใช้เชื่อมเสียดทานแบบกวนกับวัสดุทรงกระบอกที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เสริมจำนวนมาก รองรับขนาดการเชื่อมท่อที่มีขนาดใหญ่ได้ ปรับรูปแบบการทดลองการเชื่อมไม่ว่าจะเป็น ขนาดของเครื่องมือเชื่อม ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และขนาดของชิ้นงานเชื่อมได้ สามารถประยุกต์ใช้งานกับการเชื่อมท่อวัสดุอื่นได้ เช่น เหล็ก เหล็กกล้า ไร้สนิม เป็นต้น นอกจากนี้เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือกลที่มีอยู่ภายในโรงงานมาใช้สำหรับงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยที่ไม่ต้องพึ่งเครื่องจักรกลขนาดใหญ่หรือเครื่องจักรเฉพาะ

จุดด้อย เมื่อมีการปรับลดขนาดของวัสดุที่จะเชื่อมจะต้องดำเนินการสร้างศูนย์ท้ายแทนที่มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถยืนศูนย์ได้ การปรับความเร็วรอบ และความเร็วเดินเชื่อมอยู่ในช่วงที่จำกัดตามข้อจำกัดของเครื่องกัดแนวตั้ง และมอเตอร์ที่ควบคุม นอกจากนี้เมื่อต้องการเชื่อมวัสดุที่มีขนาดความยาวมากขึ้นจนเกินขนาดของโต๊ะงานของเครื่องกัดแนวตั้ง อาจจะต้องออกแบบฟิกเจอร์จับยึดท่อใหม่ เพื่อให้สามารถจับยึดท่อให้มั่นคงและแข็งแรงมากขึ้นในขณะดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

**Figure 13** Center Head

ผลการทดสอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ

ผลการทดสอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่ออลูมิเนียม 6063 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผิวหน้าของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่ออลูมิเนียม 6063 (Figure 14)

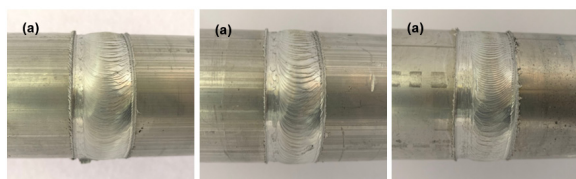


Figure 14 Surfaces of weld joints at welding speed of (a) 1.5 mm/min (b) 2.5 mm/min and (c) 3.5 mm/min

จาก Figure 14 ข้อสังเกตด้วยสายตาพบว่าความเร็วเดินเชื่อมที่ 1.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที เกิดครีบบนผิวแนวเชื่อมด้านรีทรีทิง (Retreating Side : RS) ทำให้ผิวแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอไม่สมบูรณ์ ความเร็วเดินเชื่อม 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที รอยเชื่อมจะมีจุดบกพร่องบนแนวเชื่อมระหว่างรอยต่อของรอยเชื่อมทำให้รอยเชื่อมผสานกันไม่ดี และความเร็วเดินเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที จะแตกต่างกับความเร็วเดินเชื่อมที่กล่าวข้างต้นผิวหน้าแนวเชื่อมจะมีความสมบูรณ์ที่ดีกว่าและไม่พบจุดบกพร่องใด ๆ ทำให้รอยเชื่อมประสานกันได้ดี สาเหตุที่เกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยในการเดินเชื่อม ความร้อนสะสมของวัสดุเชื่อม คืออุณหภูมิในการเชื่อม เช่นหากใช้ระดับความเร็วเดินเชื่อมเร็วจะมีข้อบกพร่องเป็นครีบนแนวเชื่อมไม่ประสานกัน หากใช้ระดับความเร็วเดินช้าข้อบกพร่องที่เกิดบนผิวหน้ารอยเชื่อมน้อยกว่า

ผลการทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่ออลูมิเนียม 6063 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 15)

จาก Figure 15 พบว่า ทุกสภาวะมีข้อบกพร่องแบบโพรง (Cavity) ในบริเวณของแนวแกน (SZ) และเมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นขนาดของโพรงก็จะมีขนาดกว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากความเร็วเดินเชื่อม นอกจากนี้ในบริเวณแนวแกน (SZ) ยังพบรูพรุนขนาดเล็ก และรอยแตก ร้าวเล็ก ๆ กระจายทั่วบริเวณ ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) ไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในบริเวณดังกล่าว ในทุกสภาวะการทดลอง สอดคล้องกับกับ ชีรภัทร ยามานนท์ (2558) ซึ่งพบว่า จุดบกพร่องในรอยเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นเป็นผลมาจากอิทธิพลมาจากความเร็วเดินเชื่อม ที่สะสมความร้อนจากการเสียดทานในรอยเชื่อมไม่มากพอที่จะทำให้วัสดุทั้งสองชิ้นเกิดสภาวะพลาสติก (Plastic Deformation) โดยที่การแก้ไขปัญหาของการเกิดโพรงในครั้งนี้ ต้องดำเนินการเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมให้มีค่ามากขึ้น ในขณะเดียวกันต้องลดความเร็วเดินเชื่อมให้น้อยลง เพื่อให้เกิดการเสียดทานในระดับที่พอเหมาะทำให้วัสดุทั้งสองชิ้นเกิดการประสานกัน

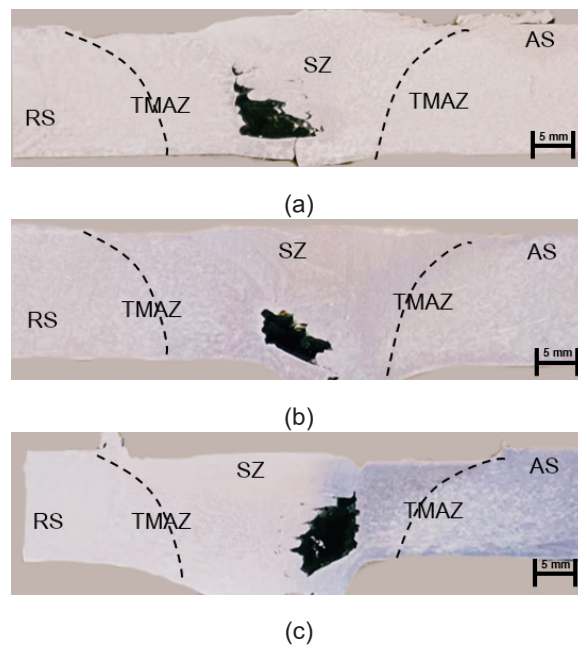


Figure 15 Macrostructures of weld joints at welding speed (a) 1.5 mm/min (b) 2.5 mm/min and (c) 3.5 mm/min

ผลการทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่ออลูมิเนียม 6063 (Figure 16)

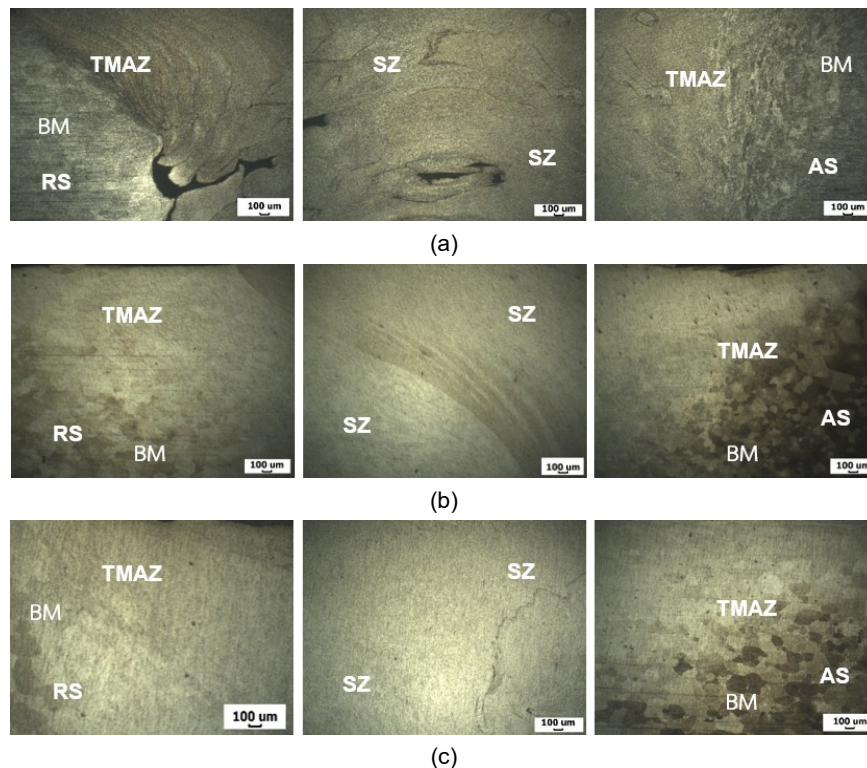


Figure 16 Microstructures of weld joints at welding speed (a) 1.5 mm/min, (b) 2.5 mm/min and (c) 3.5 mm/min

จาก Figure 16 พบว่า โครงสร้างบริเวณแนวแกน (SZ) มีลักษณะเป็นเกรนที่ละเอียดมากกว่าเมื่อเทียบกับเกรนในบริเวณบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) ทั้ง 3 ปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าบริเวณแนวแกน (SZ) เกรนจะมีความซับซ้อน โดยที่ความซับซ้อนของเกรน คือ รูปร่างของเกรนบิดเบี้ยว มีรูปร่างที่ไม่สามารถระบุรูปร่างที่แน่นอนได้ มีหลายรูปร่างปะปนกันอยู่ทั่วบริเวณแนวแกน (SZ) ต่อเนื่องไปยังบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) และพบจุดบกพร่องในบริเวณแนวแกน (SZ) ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) ด้าน Retreating Side : (RS) จะมีรูปร่างเกรนที่บิดเบี้ยวไม่เป็นรูปทรงคล้าย ๆ กับด้าน Advancing Side : (AS) แต่เมื่อเทียบกันจะพบว่าด้าน Retreating Side : (RS) มีรูปร่างของเกรนที่บิดเบี้ยวมากกว่า ซึ่งโครงสร้างของเกรนที่เกิดการบิดเบี้ยวนี้เกิดจากผลของการหมุนของหัวพินที่ส่งผลกระทบโดยตรงสู่การแพร่กระจายของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานในเนื้อชิ้นงาน สอดคล้องกันกับ ชีริกัทร ยามานนท์ (2558) โดยที่เกรนบิดเบี้ยวเสียรูปร่างจากการกดของเครื่องมือเชื่อมเมื่อเทียบกับเนื้อวัสดุอะลูมิเนียม

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม พบว่า ที่สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่

2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 149.65 MPa ส่วนความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 144.75 MPa ที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 17) ทั้งนี้จุดที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบ พบว่า จะแตกหักบริเวณแนวแกนซึ่งเป็นบริเวณที่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม

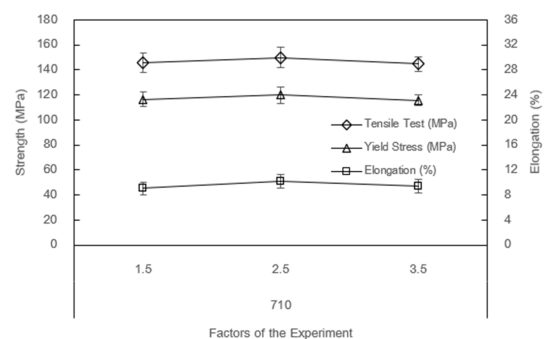


Figure 17 Tensile strength of weld joint

เมื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อม โดยการนำผลค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิม โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิม เท่ากับ 225 MPa พบว่า มีค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อมเฉลี่ยทั้ง 3 ปัจจัย ไม่เกิน 65 เปอร์เซ็นต์ โดยที่

ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อม มากที่สุด คือ 66.51 เปอร์เซนต์ ซึ่งมีผลไปในทิศทางเดียวกันกับ (Doos & Abdul Wahab, 2012) ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อมเฉลี่ย ไม่เกิน 62 เปอร์เซนต์เนื่องจากพบข้อบกพร่องกระจายทั่วบริเวณแนวแกน

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าความแข็งของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที (Figure 18) พบว่า ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่แนวแกน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 52.9 HV และชิ้นทดสอบที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 42.9 HV

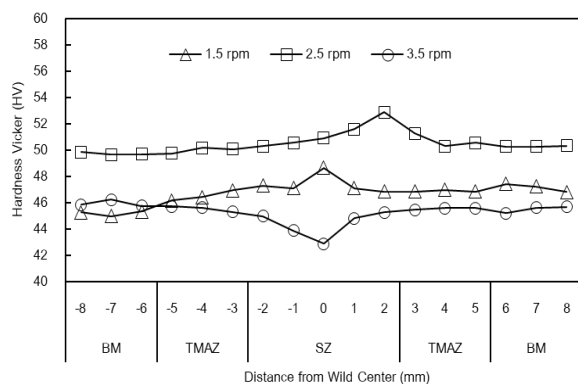


Figure 18 Hardness test of weld joint

สรุปผลการวิจัย

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ สังกำลังกับมอเตอร์ประยุกต์ใช้ร่วมกับหัวแบ่งการจับยึดท่อ สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที) และเครื่องกัดแนวตั้งสำหรับการจัดวางอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงาน สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที) โดยชิ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องจักรออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนสำหรับควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกัดแนวตั้ง ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม และส่วนยืนศูนย์ท้ายแท่น

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ สามารถเชื่อมชิ้นงานท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 10 - 152 มิลลิเมตร และมีความเร็วเดินเชื่อมที่ปรับระดับได้ตั้งแต่ 0 - 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

ทุกสภาวะการทดลองพบข้อบกพร่องแบบโพรง (Cavity) ในบริเวณของแนวแกน (SZ) และเมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นขนาดของโพรงก็จะมีขนาดกว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากความเร็วเดินเชื่อม

สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 149.65 MPa

ความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่แนวแกน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 52.9 HV

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรจัดงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2567 ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ การวิจัยและพัฒนานวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารอ้างอิง

- ธีรภัทร์ ยามานนท์. (2558). ปัจจัยความเร็วรอบและความเร็ว การเดินเชื่อมของโลหะอลูมิเนียมผสม 6061-T6 ในการเชื่อมแบบหมุนเสียดทาน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. TU Digital Collections. <https://10.14457/TU.the.2015.1309>
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน. (2567). อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ (คำขออนุสิทธิบัตร เลขที่ 2403001645). กรมทรัพย์สินทางปัญญา.
- Chen, B., Chen, K., Hao, W., Liang, Z., Yao, J., Zhang, L., & Shan, A. (2015). Friction stir welding of small-dimension Al3003 and pure Cu pipes. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.044>
- Doos, Q. M., & Abdul Wahab, B. (2012). Experimental study of friction stir welding of 6061-T6 aluminum pipe. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 1(3), 143–156. <https://www.ijmerr.com/show-121-276-1.html>
- Hattingh, D. G., Von Welligh, L. G., Bernard, D., Susmel, L., Tovo, R., & James, M. N. (2016). Semiautomatic friction stir welding of 38 mm OD 6082-T6 aluminium tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.027>
- Ismail, A., Awang, M., Samsudin, H. S., Rojan, A. M., & Jasri, M. (2016). *The hardness variation due to secondary*

heating in friction stir welding of small diameter aluminum alloy 6063 pipe. In J. P. Davim (Ed.), *Machining, joining and modifications of advanced materials* (pp. 143–152). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1082-8_13

Jain, R., Kumari, K., Kesharwani, R. K., Kumar, S., Pal, S. K., Singh, S. B., Panda, S. K., & Samantaray, A. K. (2015). *Friction stir welding: Scope and recent development.* In J. P. Davim (Ed.), *Modern manufacturing engineering* (pp. 145–171). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20152-8_6

Jamshidi, A. H., & Falahati, N. M. (2017). Orbital friction stir lap welding in tubular parts of aluminium alloy AA5083. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(7), 562–572. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1275099>

Lammlein, D. H., Gibson, B. T., DeLapp, D. R., Cox, C., Strauss, A. M., & Cook, G. E. (2012). The friction stir welding of small-diameter pipe: An experimental and numerical proof of concept for automation and manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(3), 383–398. <https://doi.org/10.1177/0954405411402767>

Na, S. J., & Lee, H. J. (1996). A study on parameter optimization in the circumferential GTA welding of aluminium pipes using a semi-analytical finite-element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93, 405–409. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02052-7](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02052-7)

Suresh, G., Suman, K. D., Acharyya, S. K., & Sanyal, D. (2023). Friction stir welding of industrial grade AISI 316L and P91 steel pipes: A comparative investigation based on mechanical and metallurgical properties. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 201, Article 104865. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104865>