

การประยุกต์การเชื่อมทิกแบบไม่ใช้โลหะเติมสำหรับการเชื่อมซ่อมรอยต่อ  
ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด

**Fillerless TIG Welding Application for Weld Repair of Tube Joint between Dissimilar  
Stainless Steel**

ชนรินทร์ รักษัตย์ ระพี กาญจนะ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ ศักดิ์ชัย จันทศรี\*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: sakchai.c@en.rmutt.ac.th

**Chanerin Ruksut, Rapee Kanchana, Kittipong Kimapong and Sakchai Chantasri\***

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

E-mail: sakchai.c@en.rmutt.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการประยุกต์การเชื่อมทิก (Tungsten inert gas welding: TIG welding) แบบไม่ใช้โลหะเติม (Fillerless metal) ในการเชื่อมรอยต่อชนท่อไร้ตะเข็บระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ด้วยการเชื่อมหนึ่งแนวและการเชื่อมซ้ำหลายแนว รอยต่อชน 3 รูปแบบถูกทำการออกแบบและเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 135 A แก๊สปกคลุม คือ แก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหล 12.5 l/min และความเร็วแนวเชื่อม 200 mm/min หลังจากนั้นถูกนำมาทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของรอยต่อและโครงสร้างมหภาค ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเชื่อมทิกแบบไม่ใช้โลหะเติมสามารถทำการเชื่อมซ่อมรอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่าง AISI304 และ AISI316L และทำให้เกิดแนวเชื่อมสมบูรณ์ได้ดังคาดหวัง เมื่อองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีค่าสูงในโลหะเชื่อมสามารถส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มความกว้างของแนวเชื่อม การเพิ่มความเว้าของแนวเชื่อม และการลดความนูนแนวราก เมื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยต่อเชื่อมพบว่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเชื่อมหลายแนวมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเชื่อมหนึ่งแนวประมาณ 20-30% รอยต่อเชื่อมซ้ำแนวที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มากกว่าให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าและโลหะเชื่อมที่มีพื้นที่แคบกว่ารอยต่อเชื่อมซ้ำแนวที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304

**คำสำคัญ:** การเชื่อมซ่อม, การเชื่อมทิกแบบไม่ใช้โลหะเติม, ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม, ความแข็งแรงดึง

Research Paper

\*Corresponding author

Received 9 August 2019

Revised 25 December 2019

Accepted 30 December 2019

## Abstract

This research aimed to apply a tungsten inert gas welding (TIG welding) for welding a seamless tube butt joint between dissimilar AISI304 and AISI316L stainless steel with one pass welding and multi-pass welding. The butt joint of 3 types was designed and was welded using a welding current of 135 A, Ar gas flow rate of 12.5 l/min, and a welding speed of 200 mm/min. The welded specimens were prepared and investigated for a relative of a joint property and metallurgical characteristic. The summarized results were as follows. TIG welding could successfully produce a multi-pass welding of dissimilar AISI304 and AISI316L stainless steel butt joint as expectation. When an AISI304 stainless steel component was higher in the weld metal, an increase of a weld width, an increase of a weld concave, and a decrease of a root convex could be observed. When compared a tensile strength of the welded joint, it found that a tensile strength of the multi-pass welded joint was 20-30% lower than that of the one pass welded joint. The multi-pass welded joint that composed larger amount of AISI304 stainless steel composition produced higher tensile strength and narrower weld area than that of AISI304 stainless steel.

**Keywords:** Repair welding, Fillerless TIG welding, Stainless steel tube, Tensile strength

## 1. บทนำ

การเชื่อมต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเป็นสิ่งท้าทายและยากลำบากในการปฏิบัติการเนื่องจากเหล็กกล้าทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติทางกล เคมี และกายภาพที่แตกต่างกัน [1] เนื่องจากความยากลำบากในการควบคุมตัวแปรการเชื่อมเพื่อทำให้เกิดการอาร์คคงที่บริเวณรอยต่อที่สามารถทำให้เกิดรอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ (Sound joint) เมื่อทำการเชื่อมรอยต่อแล้วมักทำให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ โดยเฉพาะจุดบกพร่องที่เกิดการเปลี่ยนรูปของสารประกอบโลหะจากโครเมียมออกไซด์เป็นโครเมียมโครเมียมคาร์ไบด์เมื่อได้รับความร้อน และทำให้เกิดความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมลดลง [2-3] ด้วยเหตุนี้การเชื่อมซ่อมพื้นที่เกิดการกัดกร่อนและชำรุดจึงจำเป็นต้องมีการดำเนินการเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความสมบูรณ์และสามารถใช้งานในระบบท่อลำเลียงอย่างมีประสิทธิภาพ

การเชื่อมซ่อมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมและท่อที่เกิดการเสียหายเดิมที่เกิดความเสียหายให้สามารถกลับมาใช้ใหม่ได้และไม่ก่อให้เกิดขยะอุตสาหกรรม การเชื่อมซ่อมหรือการเชื่อมซ่อมแนวสามารถทำได้ด้วยกระบวนการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding: GTAW) [4-5] การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) [6] การเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) [7-10] การเชื่อมอาร์กหลอดไส้ฟลักซ์ (Flux cored arc welding: FCAW) [11] การเชื่อมเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> laser welding) [12-13] เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการใน

การเชื่อมท่อผนังบาง การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม หรือการเชื่อมทิก (Tungsten inert gas welding: TIG welding) อาจเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถจำกัดการกระจายความร้อนออกด้านข้างแนวเชื่อมและสามารถทำให้เกิดการแทรกซึมความร้อน (Heat penetration) ลงสู่ด้านล่างได้ดีกว่ากระบวนการเชื่อมอื่นๆ [14] ด้วยเหตุนี้การเชื่อมทิกจึงเป็นวิธีการที่สามารถใช้ในการเชื่อมซ่อมที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่มีความเหมาะสมกว่า ดังพบได้ในการเชื่อมซ้ำหลายแนวท่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 บนแผ่นหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [13] หรือการเชื่อมซ้ำรอยต่อท่อและแผ่นเหล็กกล้า HDSS [5] หรือการเชื่อมซ้อนแนวท่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผนังหนา [10] หรือการเชื่อมซ้ำแนวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมผิวเคลือบพิเศษ UNS32750 [15] เป็นต้น

ข้อมูลการวิจัยข้างต้น พบว่าการเชื่อมซ่อมซ้อนแนวรอยเชื่อมที่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L และ AISI304 มีรายงานไว้ค่อนข้างจำกัด หากนำกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่ใช้โลหะเติมมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมซ่อมรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถทำให้เกิดผลกระทบเนื่องจากความร้อนในวงแคบที่อาจทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของท่อกว่ากระบวนการเชื่อมอื่นๆ คาดว่าสามารถก่อให้เกิดประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่าของรอยต่อเดิมและสามารถนำรอยต่อกลับมาใช้งานใหม่ได้ นอกจากนี้ ข้อมูลการทดลองที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์การเชื่อมซ่อมในระบบท่อลำเลียงของเหลวในงานอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## 2. วิธีการทดลอง

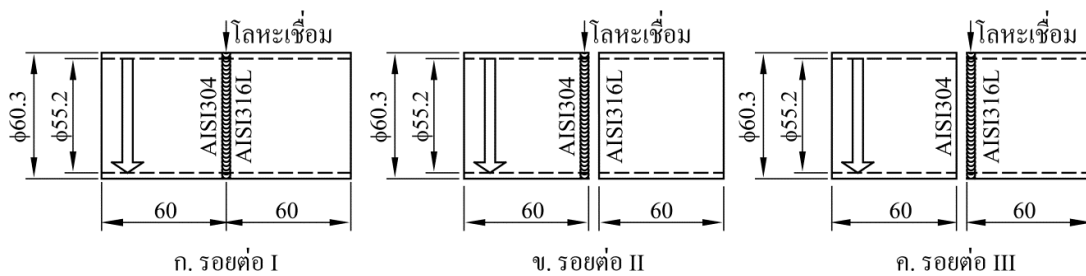
ท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 mm ความหนาผนังท่อ 2.8 mm และมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 ถูกใช้เป็นวัสดุทดลองในการทดลองนี้ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมถูกตัดให้มีความยาว 60 mm ดังรูปที่ 1 ก. ก่อนทำการเชื่อมทิกแบบไม่ใช้โลหะเติม วัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อม คือ แท่งสะเตน EWTh-2 เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 mm ตัวแปรการเชื่อมอื่นๆ ประกอบด้วยกระแสเชื่อม 135 A แก๊สปกคลุม คือ แก๊สอาร์กอน 99.99% ที่อัตราการไหล 12.5 l/min และความเร็วแนวเชื่อมที่วัดจากความเร็วขอบของพื้นผิวภายนอกของท่อที่มีการหมุนรอบตัวเท่ากับ 200 mm/min

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (% โดยน้ำหนัก)

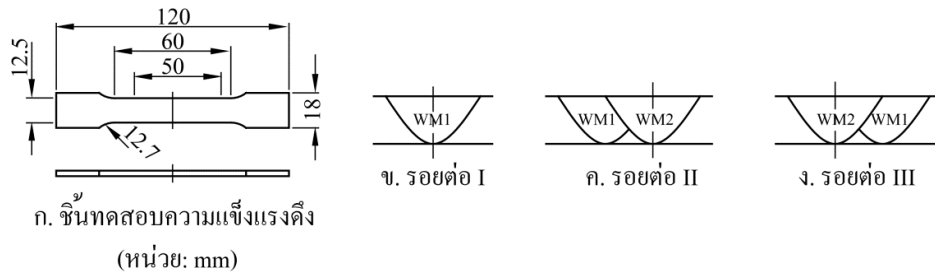
วัสดุ	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
AISI304	สมดุล	0.03	18.00	8.10	1.90	0.60	0.04	0.03
AISI316L	สมดุล	0.02	17.50	10.00	1.80	0.07	0.01	0.02

หลังจากทำการเชื่อมรอยต่อครั้งที่ 1 (รอยต่อ I) รอยต่อถูกตัดด้านข้างแนวเชื่อมแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ประกอบด้วย การตัดขอบแนวเชื่อมที่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ดังรูปที่ 1 ข. และการตัดขอบแนวเชื่อมที่

ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ดังรูปที่ 1 ก. หลังจากทำการตัดแนวเชื่อมออกแล้วผิวหน้าแนวเชื่อมและแนวรากที่มีความนูนถูกปรับด้วยเครื่องเจียรระโนมือเพื่อให้มีความเรียบในระดับเดียวกันกับความหนาของผนังท่อ แนวเชื่อมจากเชื่อมครั้งที่ 1 นี้ถูกสมมติให้เป็นแนวเชื่อมเดิมที่มีการเชื่อมไปใช้งานแล้วและเกิดความเสียหายและจำเป็นต้องมีการเชื่อมซ่อมซ้ำแนวเดิมเพื่อต่อเข้ากับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมใหม่ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนใดๆ รอยต่อในการเชื่อมซ่อมแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบประกอบด้วย รอยต่อชนกรเชื่อมซ่อมโลหะเชื่อมเดิมและท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ใหม่ (รอยต่อ II) ดังรูปที่ 1 ข. และรอยต่อชนกรเชื่อมซ่อมโลหะเชื่อมเดิมและท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ใหม่ (รอยต่อ III) ดังรูปที่ 1 ค. ตัวแปรการเชื่อมซ่อมรอยต่อมีค่าเดียวกันกับตัวแปรการเชื่อมในการเชื่อมรอยต่อชนครั้งที่ 1 ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 1 รูปแบบรอยต่อกรเชื่อม (หน่วย: mm)



รูปที่ 2 ขั้นตอนทดสอบแรงดึงและลักษณะแนวเชื่อม

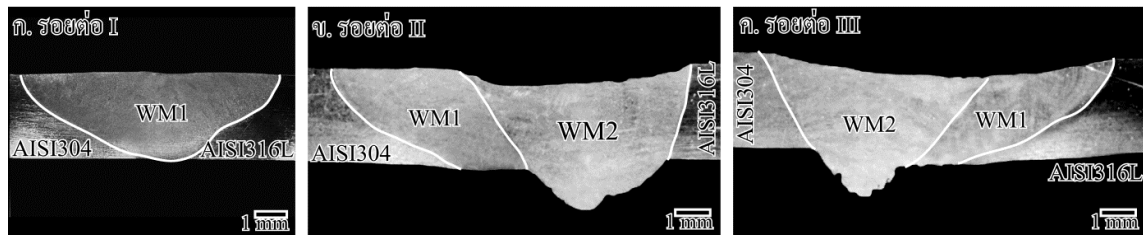
เมื่อรอยต่อในรูปที่ 1 ถูกทำการเชื่อมเสร็จสิ้น รอยต่อถูกนำมาทำการเตรียมเพื่อทำการตรวจสอบสมบัติของรอยต่อประกอบด้วยความแข็งแรงดึง ความแข็ง และ โครงสร้างมหภาค ในการตรวจสอบความแข็งแรงของรอยต่อขั้นตอนทดสอบถูกเตรียมให้มีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 2 ก. ซึ่งมีความยาวเกจเท่ากับ 50 mm โดยกำหนดให้แนวเชื่อมอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขั้นตอนทดสอบในกรณีของรอยต่อ I ดังรูปที่ 2 ข. และกำหนดให้กึ่งกลางของแนวเชื่อมที่ 2 (WM2) ของรอยต่อ II และ III อยู่ที่กึ่งกลางของขั้นตอนทดสอบดังรูปที่ 2 ค. และ ง. ตามลำดับ ในการทดสอบความแข็งแรงดึงกำหนดให้อัตราการเกิดความเครียด 1 mm/min

ภาคตัดตั้งฉากแนวเชื่อมถูกตัดออกมาเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค พื้นผิวที่ได้ถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-1500 ที่มีน้ำไหลผ่านเพื่อปรับระนาบพื้นผิว ขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1  $\mu\text{m}$  บนผ้า

ลักษณะที่มีการหล่อขึ้นด้วยแอลกอฮอล์จนกระทั่งพื้นผิวที่เกิดจากการขัดหยาบหายไป จากนั้นทำการกัดพื้นผิวขัดมันด้วยสารละลายที่กำหนดเพื่อแสดงรายละเอียดของเกรนและเฟสในพื้นผิวที่ตรวจสอบ พื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการขัดถูนำมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องขยายเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อม สมบัติทางกล และโครงสร้างมหภาค

การทดสอบความแข็งในการทดลองนี้ใช้การทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์สที่ใช้น้ำหนักทดสอบ 200 gf เวลาทดสอบ 10 s ลงบนพื้นผิวที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างโครงสร้างมหภาค กำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.25 mm

### 3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

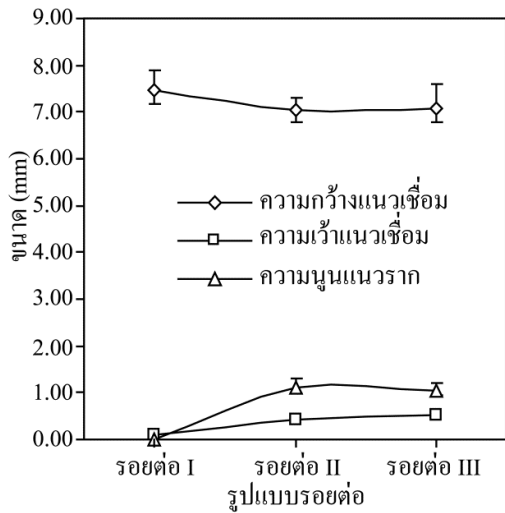


รูปที่ 3 โครงสร้างมหภาครอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมซ้ำแนว

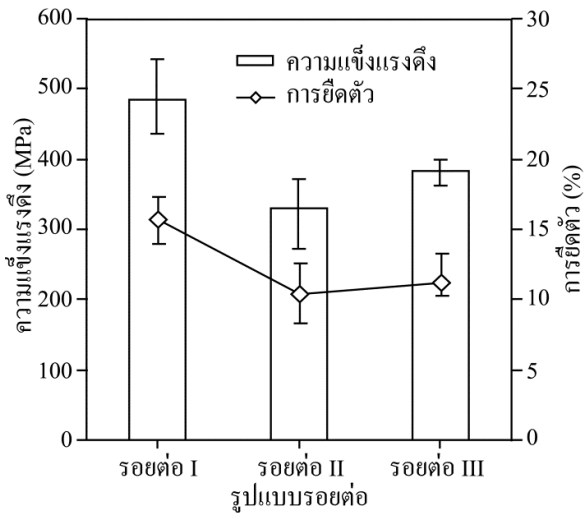
รูปที่ 3 ก. แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่าง AISI304 และ AISI316L แบบที่ 1 (รอยต่อ I) ผลการตรวจสอบพบว่าที่ตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดทำให้เกิดรอยต่อสมบูรณ์ (Sound joint) ที่โลหะเชื่อมไม่ปรากฏจุดบกพร่องใดๆ โลหะเชื่อมที่ได้ถูกเติมเต็มความหนาของผนังท่อ เมื่อทำการวัดความนูนของแนวเชื่อมและความนูนของแนวรากแนวเชื่อม พบว่าค่าความนูนของผิวหน้าแนวเชื่อมและแนวรากมีค่าใกล้เคียงพื้นผิวเดิมดังรูปที่ 4

รอยต่อที่ได้เมื่อถูกนำไปทำการเชื่อมซ้ำด้วยวิธีการดังรูปที่ 1 ข. และ ค. ทำให้ได้โครงสร้างมหภาคของรอยต่อ II และ III ดังรูปที่ 3 ข. และ ค. จุดบกพร่อง เช่น รูพรุน (Porosity) โพรงอากาศ (Blow hole) หรือการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) ไม่สามารถตรวจพบได้ในโครงสร้างมหภาคของรอยต่อเชื่อมซ้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจสอบรูปร่างของโลหะเชื่อมซ้ำแนวที่ 2 (WM2) เปรียบเทียบกับโลหะเชื่อมแนวที่ 1 (WM1) ที่ไม่ผ่านการเชื่อมซ้ำ พบว่ารูปร่างของแนวเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4 ความเว้าของแนวเชื่อมและความนูนของแนวรากมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ขณะเดียวกันค่าความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลง ผลการทดลองที่ได้พบว่า โลหะเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมแล้ว 1 ครั้งซึ่งมีโครงสร้างการหล่อซ้ำ (Recast structure) มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ดีกว่า ความร้อนขาเข้า (Heat input) ที่มีค่าเท่าเดิมมีความสามารถในการทำให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายได้ดีกว่าต่อเหล็กกล้าที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนหรือ

การเชื่อม โลหะหลอมละลายในพื้นที่แคบเกิดการกดตัวลงต่ำทำให้เกิดการเพิ่มความเว้าแนวเชื่อม (0.4 และ 0.5 mm สำหรับรอยต่อ II และ รอยต่อ III) และการเพิ่มความนูนของแนวรอก (1.3 และ 1.2 mm สำหรับรอยต่อ II และ รอยต่อ III) ภายในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดได้



รูปที่ 4 ขนาดรูปร่างโลหะเชื่อมรอยต่อแบบต่างๆ

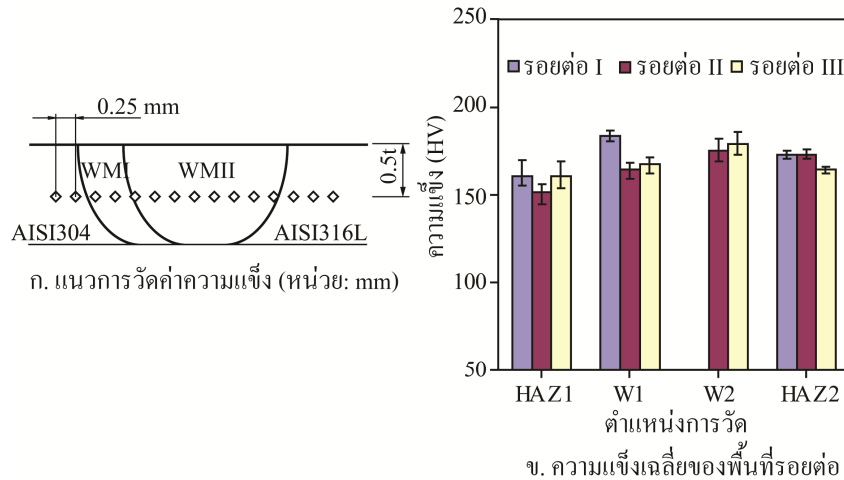


รูปที่ 5 ความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อแบบต่างๆ

รอยต่อทั้ง 3 แบบถูกนำไปทำการทดสอบความแข็งแรงดึงและแสดงค่าความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 5 พบว่า รอยต่อเชื่อมซ้ําแนว หรือรอยต่อ II และ III นั้นแสดงค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าต่ำกว่ารอยต่อ I หรือรอยต่อที่ผ่านการเชื่อมเพียงครั้งเดียวที่ค่าประมาณ 32 และ 21% และแสดงการยืดตัวของรอยต่อที่มีค่าต่ำกว่ารอยต่อ I ที่ค่าประมาณ 34 และ 22% การลดลงของค่าความแข็งแรงของรอยต่อนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียปริมาณ โลหะเชื่อม เนื่องจากการเกิดการเว้าของผิวหน้าโลหะเชื่อมลงในผนังท่อและการเพิ่มค่าความนูนของแนวรอกลงไปนผิวด้านในของท่อเหล็กกล้า เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อ II และ III พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อ II มีค่าต่ำกว่ารอยต่อ III และพบว่าความเสียหายของรอยต่อเกิดขึ้นในพื้นที่โลหะเชื่อมซ้ําแนว (WM2) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความเสียหายขึ้นทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อ II และ III



รูปที่ 7 ค่าความแข็งของโลหะเชื่อมในรอยต่อต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าความเสียหายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงกับผลการทดสอบความแข็งของโลหะเชื่อมภายในรอยต่อดังรูปที่ 7 พบว่าค่าความแข็งของโลหะเชื่อมที่ตำแหน่งความเสียหายของรอยต่อทั้ง 3 แบบมีค่าสูงสุดในพื้นที่รอยต่อนั้นๆ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยในพื้นที่ที่มีความเสียหายพบว่าค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงดัง กล่าวคือโลหะเชื่อมของรอยต่อที่มีค่าความแข็งสูงกว่าแสดงค่าความแข็งแรงสูงกว่า ค่าความแข็งเรียงลำดับจากสูงไปต่ำ คือ โลหะเชื่อมครั้งที่ 1 (WM1) ของรอยต่อ I โลหะเชื่อมครั้งที่ 2 (WM2) ของรอยต่อ III และโลหะเชื่อมครั้งที่ 2 (WM2) ของรอยต่อ II

ผลการทดลองที่ได้พบว่าการเชื่อมโลหะเชื่อมเดิมกับเหล็กกล้าไร้สนิมใหม่ของรอยต่อต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L นั้น การเชื่อมควรดำเนินการที่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 เนื่องจากรอยต่อที่ได้มีค่าความแข็งแรงสูงและการยึดตัวที่มีค่าสูงกว่า อย่างไรก็ตามในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดนี้ควรมีการพิจารณาด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากการเพิ่มความหนาแนวรากอาจทำให้เกิดการขัดขวางของไหลที่มีการส่งถ่ายในท่อลำเลียงได้

#### 4. สรุปผลการทดลอง

รอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ถูกนำมาทำการเชื่อมซ่อมโดยการเชื่อมซ้อนแนวเชื่อมเดิม และทำการศึกษสมบัติของรอยต่อประกอบด้วยความแข็งแรง ความแข็ง และโครงสร้างมหภาคของรอยต่อ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

4.1 การเชื่อมทิกแบบไม่ใช้โลหะเติมสามารถทำการเชื่อมซ่อมรอยต่อต่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L และทำให้เกิดแนวเชื่อมสมบูรณ์ได้ดังคาดหวัง

4.2 เมื่อองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีค่าสูงในโลหะเชื่อมสามารถส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มความกว้างของแนวเชื่อม การเพิ่มความเว้าของแนวเชื่อม และการลดความหนาแนวราก

4.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยต่อเชื่อม พบว่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเชื่อมหลายแนวมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงของรอยต่อเชื่อมหนึ่งแนวประมาณ 20-30%

4.4 รอยต่อเชื่อมแนวที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มากกว่าให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าและโลหะเชื่อมที่มีพื้นที่แคบกว่ารอยต่อเชื่อมแนวที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2561

### เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Kaewsakul and K. Kimapong, "Friction stir welding of 6063 aluminum alloy and 304 stainless steel butt joint," *Journal of Research and Development*, Vol. 20, 2009, pp. 79-86.
- [2] M. Song and K. Guan, "Failure analysis of a weld-decayed austenitic stainless steel," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, 2011, pp. 1613-1618.
- [3] A.I. Karayan and H. Castaneda, "Weld decay failure of a UNS S31603 stainless steel storage tank," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 44, 2014, pp. 351-362.
- [4] D. Deng, S. Kiyoshima, K. Ogawa, N. Yanagida and K. Saito, "Predicting welding residual stresses in a dissimilar metal girth welded pipe using 3D finite element model with a simplified heat source," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, 2011, pp. 46-54.
- [5] H.J. Kim, S.H. Jeon, S.T. Kim and Y.S. Park, "Influence of the shielding gas composition on the passive film and erosion corrosion of tube-to-tube sheet welds of hyper duplex stainless steel," *Corrosion Science*, Vol. 91, 2015, pp. 140-150.
- [6] C. Heinze, C. Schwenk and M. Rethmeier, "Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding under high restraint conditions," *Materials & Design*, Vol. 35, 2012, pp. 201-209.
- [7] T. Branza, F. Deschaux-Beaume, V. Velay and P. Lours, "A microstructural and low-cycle fatigue investigation of weld-repaired heat-resistant cast steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 944-953.
- [8] J. Oñoro, "Weld metal microstructure analysis of 9–12% Cr steels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, 2006, pp. 540-545.



- [9] P.C. Tung, M.C. Wu and Y.R. Hwang, "An image-guided mobile robotic welding system for SMAW repair processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, 2004, pp. 1223-1233.
- [10] D. Deng, H. Murakawa and W. Liang, "Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe," *Computational Materials Science*, Vol. 42, 2008, pp. 234-244.
- [11] H.W. Lee, "Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 445-446, 2007, pp. 328-335.
- [12] A.F.M. Arif, A.S. Al-Omari, B.S. Yilbas and Y.N. Al-Nassar, "Thermal stress analysis of spiral laser-welded tube," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, 2011, pp. 675-687.
- [13] W. Jiang, Y. Luo, B.Y. Wang, S.T. Tu and J.M. Gong, "Residual stress reduction in the penetration nozzle weld joint by overlay welding," *Materials & Design*, Vol. 60, 2011, pp. 443-450.
- [14] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2nd edition, John Wiley & Sons, USA, 2003.
- [15] K. Devendranath Ramkumar, G. Thiruvengatam, S.P. Sudharsan, D. Mishra, N. Arivazhagan and R. Sridhar, "Characterization of weld strength and impact toughness in the multi-pass welding of super-duplex stainless steel UNS 32750," *Materials & Design*, Vol. 60, 2014, pp. 125-135.