

ผลกระทบของแรงและเวลาอัดในกระบวนการเชื่อมเสียดทานที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} รอมฎอน บุระพา² และ วรธนพร ชีววุฒิพงษ์³
worapong.b@rmutsv.ac.th^{1*}, romadorn.b@hotmail.com², c.watthanaphon@gmail.com³

¹⁻³ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹⁻³ หน่วยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทคัดย่อ

Received	: 28-Jun-2019
Revised	: 13-Nov-2019
Accepted	: 15-Nov-2019

การเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น เกิดความร้อนในกระบวนการเชื่อมต่ำ ประสิทธิภาพการผลิตสูง มีความสะดวกในการผลิต และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วัสดุที่ยากต่อการเชื่อมในสภาวะการเชื่อมแบบหลอมละลายสามารถเชื่อมได้โดยการเชื่อมเสียดทาน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยในครั้งนี้นี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อเชื่อมเสียดทานระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ซึ่งมีตัวแปรการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม คือ 1400 รอบต่อนาที แรงดันเสียดทาน คือ 40 บาร์ แรงดันอัด 3 ระดับ คือ 40 50 60 บาร์ เวลาเสียดทาน คือ 3 วินาที และเวลาอัด 3 ระดับ คือ 3 5 7 วินาที ผลการทดลองพบว่า ตัวแปรการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อมีค่าเท่ากับ 729.8 MPa สำหรับรอยเชื่อมที่ทดลองภายใต้ปัจจัยการเชื่อมเสียดทานด้วยแรงดันอัด 40 บาร์ เวลาอัด 3 วินาที

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทาน โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม

Effects of Compressive Force and Time in Friction Welding Process on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1045 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Joint

Worapong Boonchouytan^{1*}, Romadon Burapa² and Watthanaphon Cheewawuttipong³
worapong.b@rmuts.ac.th^{1*}, romadorn.b@hotmail.com², c.watthanaphon@gmail.com³

^{1*3} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srvijaya

^{1*3} Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srvijaya

Received	: 28-Jun-2019
Revised	: 13-Nov-2019
Accepted	: 15-Nov-2019

Abstract

Friction welding is a solid-state welding process, which is widely used due to its low heat generation, high production efficiency, production convenience, and environmental friendliness. Difficult to fusion weld materials could be success weld by this process. Therefore, this study aimed to determine the microstructure and mechanical properties of friction welding joint between the carbon steel AISI 1045 and the stainless steel AISI 304. The welding process parameter consisted of a rotation speed of 1400 rpm, a friction pressure of 40 bar, 3 levels of compressive pressure (40, 50 and 60 bar), 3 seconds friction time, and compression times of 3, 5 and 7 seconds, respectively. The results showed that the welding process parameter affected to vary the tensile strength of the joint. The maximum tensile strength of 729.8 MPa could be observed when the compressive time of 40 bar, the friction time of 3 seconds, and compress time of 3 seconds, were applied.

Keywords: friction welding, microstructure, mechanical properties, carbon steel, stainless steel.

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้มีการนำเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักร เพลลา ข้อเหวี่ยง และเกียร์ เนื่องจากวัสดุนี้มีสมบัติที่มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานการสึกหรอที่ดี และต้นทุนต่ำ [1 - 2] เช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่น ๆ ถูกใช้เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างสำหรับงานท่อน้ำยาหล่อเย็น เครื่องปฏิกรณ์ ตัววาล์ว และเครื่องเรือ ซึ่งมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อน [3 - 5] แต่การเชื่อมในสภาวะหลอมละลายส่งผลต่อขนาดของเกรนที่หยาบขึ้นในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone; HAZ) และอาจส่งผลต่อสมบัติทางกลให้ลดลงได้ ซึ่งสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทาน [6 - 9] การใช้งานรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อนำข้อดีของวัสดุสองชนิดมารวมกัน เป็นเรื่องยากที่จะทำให้วัสดุที่แตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีสมบัติทางกล รวมถึงสมบัติทางความร้อน อย่างไรก็ตามสามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding; FW) [10]

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นวิธีการเชื่อมที่พัฒนาจากสถาบันการเชื่อมแห่งสหราชอาณาจักร (The Welding Institute; TWI) ในปี พ.ศ. 2534 (ค.ศ. 1991) [11] โดยมีหลากหลายวิธี เช่น การเชื่อมเสียดทานแบบโรตารี (Rotary Friction Welding; RFW) การเชื่อมเสียดทานแบบตรง (Linear Friction Welding; LFW)

และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Welding Stir; FSW) [12 - 14] กระบวนการเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมโลหะให้ประสานเข้าด้วยกันซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานสองชิ้น ทำให้วัสดุเกิดความร้อนและเข้าสู่สภาพหนืดหรืออ่อนตัวลง [15 - 17] การเชื่อมเสียดทานเหมาะสำหรับรอยเชื่อมที่ต้องการผสานกันของโลหะสองชนิดที่ต่างกัน มีการใช้งานและสมบัติที่แตกต่างกัน รวมถึงสามารถประหยัดต้นทุนที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีราคาแพงและหายาก การเชื่อมแบบหลอมละลายของการผสานกันของโลหะที่แตกต่างกันยังไม่เป็นที่ต้องการในการปฏิบัติจริง เนื่องจาก การทำให้เกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ที่เปราะและต่ำ เนื่องจากความแตกต่างกันของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ส่งผลทำให้มีสมบัติทางกลลดลงไปด้วย ดังนั้นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งจึงเป็นกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสม และน่าจะส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ดีกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทาน เช่น Ambroziak, A., และคณะ [18] พบว่า ปัจจัยของการเชื่อมเสียดทานระหว่างวัสดุอลูมิเนียมกับเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อม สมบัติความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดัด และความแข็งแรงเฉือน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันเสียดทาน เวลาเสียดทาน และ แรงดันอัด ใน ส่วน ของ Satyanarayana, V.V. และคณะ [19] ได้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดระหว่าง

เหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกกับเฟอร์ริติก พบว่ารอยเชื่อมในด้านวัสดุของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกมีความเค้นตกค้างสูงในรอยเชื่อมเนื่องจากมีความเค้นไหลที่สูงขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัววัสดุอันเนื่องมาจากความร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนี้ Ma, H. และคณะ [20] ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการเชื่อมเสียดทาน พบว่า การเชื่อมสามารถระบุอินเตอร์เฟซ (Interface) ในบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully Deformed Zone; FPDZ) ได้ชัดเจนโลหะทั้งสองชนิดเชื่อมต่อกัน โครงสร้าง Pearlite มีความหนาแน่นมากขึ้น และเกิด Ferrite ในบริเวณ DZ จากรายงานการวิจัยดังกล่าวการศึกษาตัวแปรการเชื่อมของความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด และเวลาอัด ของการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ยังไม่ปรากฏเป็นหลักฐานแน่ชัดมากนัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) โดยมีตัวแปรการเชื่อมเสียดทาน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันเสียดทาน แรงดันอัด เวลาเสียดทาน และเวลาอัด และสามารถนำผลงานวิจัยไปประยุกต์ใช้หรือเป็นฐานข้อมูลให้กับภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

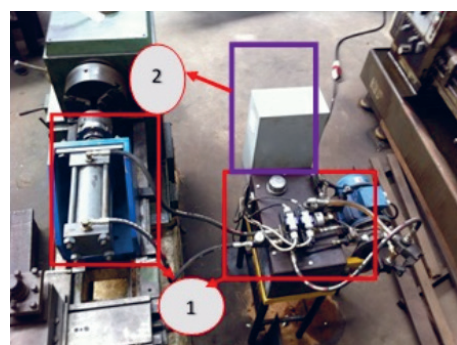
2. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1. วัสดุที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มีส่วนผสม

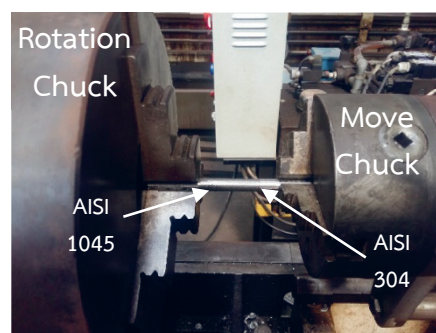
ทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วย C-0.45, Mn-0.70, P-0.04, S-0.05, Fe-98.76 และเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วย C-0.08, Mn-2.00, P-0.045, S-0.03, Si-0.08, Cr-18.00, Ni-8.00, N-0.10, Fe-77.67 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทาน คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และความยาว 50 มิลลิเมตร

2.2. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทาน

2.2.1 เครื่องกลึงยืนศูนย์ ยี่ห้อ Torrent รุ่น mod. T. 71-68 ใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทาน



(ก) อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทาน



(ข) การจับยึดชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 1 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน

2.2.2 อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 1(ก) ใช้ในการทดลองการเชื่อม

เสียดทาน มีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนจับยึดชิ้นงานและระบบไฮดรอลิกส์ ส่วนสองเป็นระบบควบคุมของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทาน และมีลักษณะการจับยึดชิ้นงานเชื่อมดังรูปที่ 1(ข) โดยวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) จับยึดด้านหัวจับที่หมุนได้โดยใช้ปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อมเป็นปัจจัยในการเชื่อม ส่วนวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) จับยึดฝั่งด้านหัวจับที่เคลื่อนที่เข้าหาโดยใช้ปัจจัยแรงดันอัดและเวลาอัดเป็นปัจจัยในการเชื่อม

2.3. กระบวนการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding : FW) โดยควบคุมตัวแปรต่าง ๆ อันประกอบด้วย

2.3.1 ความเร็วหมุนเชื่อม คือ 1400 รอบต่อนาที (rpm)

2.3.2 แรงดันเสียดทาน คือ 40 บาร์ (bar)

2.3.3 แรงดันอัด 3 ระดับ คือ 40, 50, 60 บาร์

2.3.4 เวลาเสียดทาน คือ 3 วินาที (s)

2.3.5 เวลาอัด 3 ระดับ คือ 3, 5, 7 วินาที โดยแสดงปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทาน ดังตารางที่ 1

2.4. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยการนำชิ้นงานไปผ่าครึ่งด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น CS – 230 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปหล่อเรซิน แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงละเอียด แล้วขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้ง จากนั้นนำไปกัดด้วยกรดซิลเลอร์เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับมหภาค และระดับจุลภาค โดยมีตำแหน่งการส่องกล้องจุลทรรศน์

คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone; HAZ) บริเวณการเสียรูป (Deformation Zone; DZ) และบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully Deformed Zone; FPDZ) ซึ่งทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และทดสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทาน

ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)	เวลาอัด (s)	แรงดันอัด (bar)	จำนวนทดลองซ้ำ (times)	หมายเลขการทดลอง
1400	3	40	3	1
		50	3	2
		60	3	3
	5	40	3	4
		50	3	5
		60	3	6
	7	40	3	7
		50	3	8
		60	3	9

2.5. การทดสอบสมบัติทางกลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบความแข็ง และการทดสอบความแข็งแรงดึง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การทดสอบความแข็ง นำมาจากชิ้นงานที่ผ่าครึ่งอีกด้านหนึ่งมาทำการหล่อเรซินแล้วขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงละเอียด และขัดต่อด้วยผ้าสักหลาดพอเรียบเสร็จแล้วนำมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ต่อหนึ่งรอยกด โดยใน 1 ชิ้นงานทดสอบจะกดทั้งหมด 3 แนว แล้วนำทั้ง 3 แนว

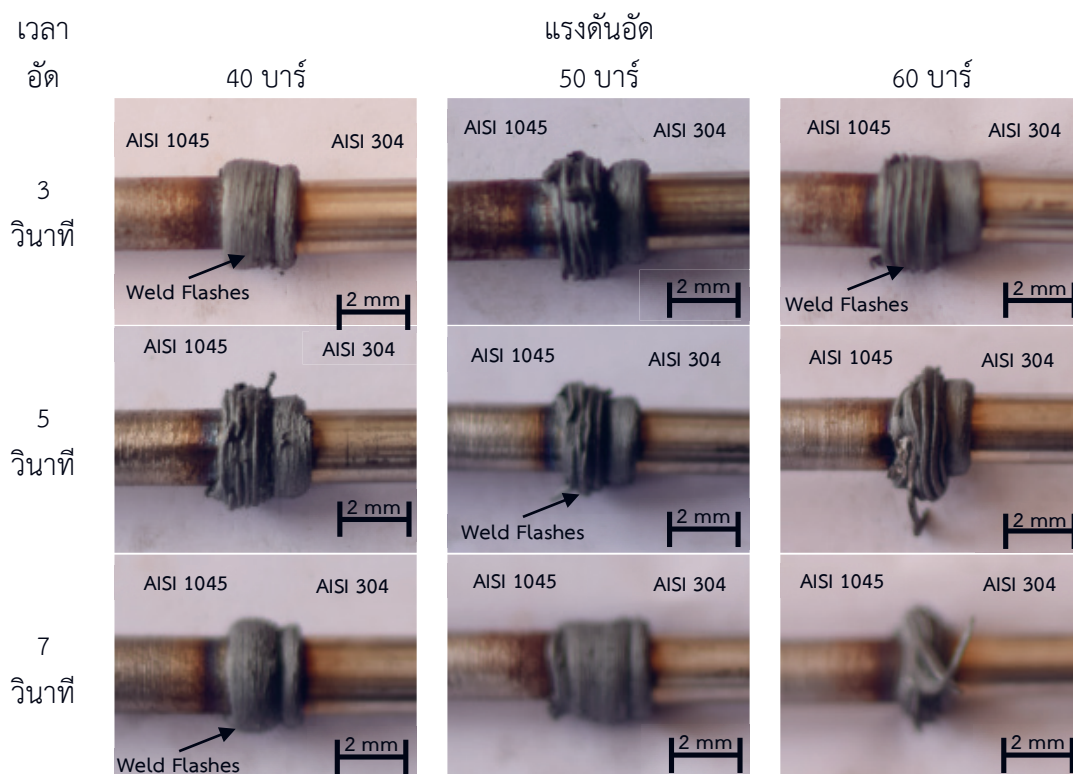
มาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นงานทดสอบแต่ละสภาวะการทดลอง

2.5.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุภายใต้การรับภาระหรือแรงแบบดึง การเตรียมชิ้นทดสอบในขั้นตอนนี้ขึ้นทดสอบที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมเสียหายนจะนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M ด้วยเครื่องกลึงยันศูนย์ เมื่อแปรรูปชิ้นงานทดสอบเสร็จก็นำไปทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์ที่อุณหภูมิห้องโดยมีความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1. ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมเสียหายน ดังรูปที่ 2 พบว่า ไม่มีข้อบกพร่องที่มี

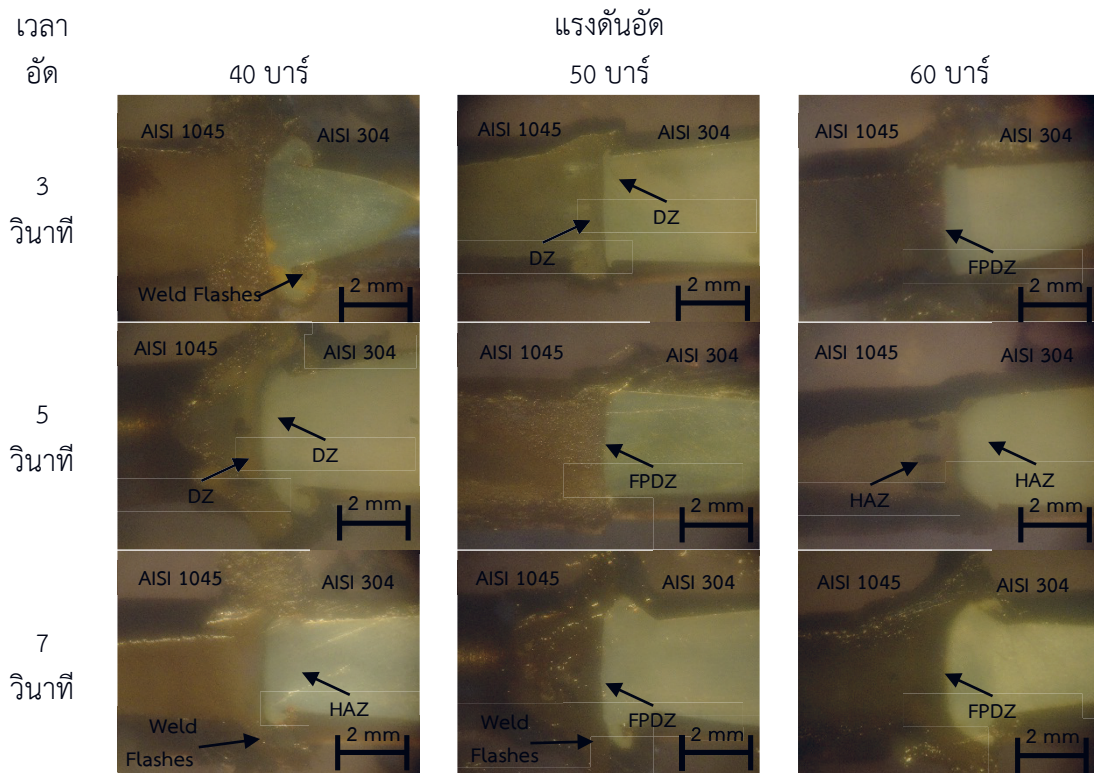
ผลต่อรอยเชื่อมหรือความไม่ต่อเนื่องของรอยเชื่อมปรากฏอยู่บนรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีการประสานของวัสดุทั้งสองชนิดได้เป็นอย่างดี แรงดันอัดส่งผลโดยตรงต่อรูปร่างของแนวเชื่อม โดยเฉพาะครีบของแนวเชื่อม (Weld Flashes) ที่มีเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดสูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 บาร์ ซึ่งมีผลการศึกษาล้ายกับ Satyanarayana V V และคณะ [19] ยิ่งไปกว่านั้นครีบของด้านวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) นั้นมีมากกว่าด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ในทุก ๆ ปัจจัยการเชื่อม ผลลัพธ์นี้เกิดจากการที่มีส่วนประกอบของโลหะผสม โดยเฉพาะโครเมียม (Cr) ในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) ที่อุณหภูมิสูง [20]



รูปที่ 2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมเสียหายนเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

3.2. โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 3 พบว่า ครีบที่เกิดขึ้นบนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มีขนาดใหญ่กว่าที่อยู่ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ในรอยเชื่อมพบบริเวณที่สำคัญของรอยเชื่อม ประกอบด้วย บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone; HAZ) บริเวณการเสียรูป (Deformation Zone; DZ) และบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully

Deformed Zone; FPDZ) รอยเชื่อมในทุกกรณีไม่มีข้อบกพร่อง มีครีบเกิดขึ้นบริเวณขอบของรอยเชื่อมซึ่งเกิดจากการเสียรูปเชิงพลาสติกในวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า [21] ข้อสังเกตพบว่าถ้าเมื่อยิ่งเพิ่มแรงดันจะทำให้เกิดครีบเพิ่มมากขึ้น ความกว้างของบริเวณ DZ และบริเวณ HAZ ด้านวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) นั้น มีความกว้างกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) เนื่องจากมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า [22]



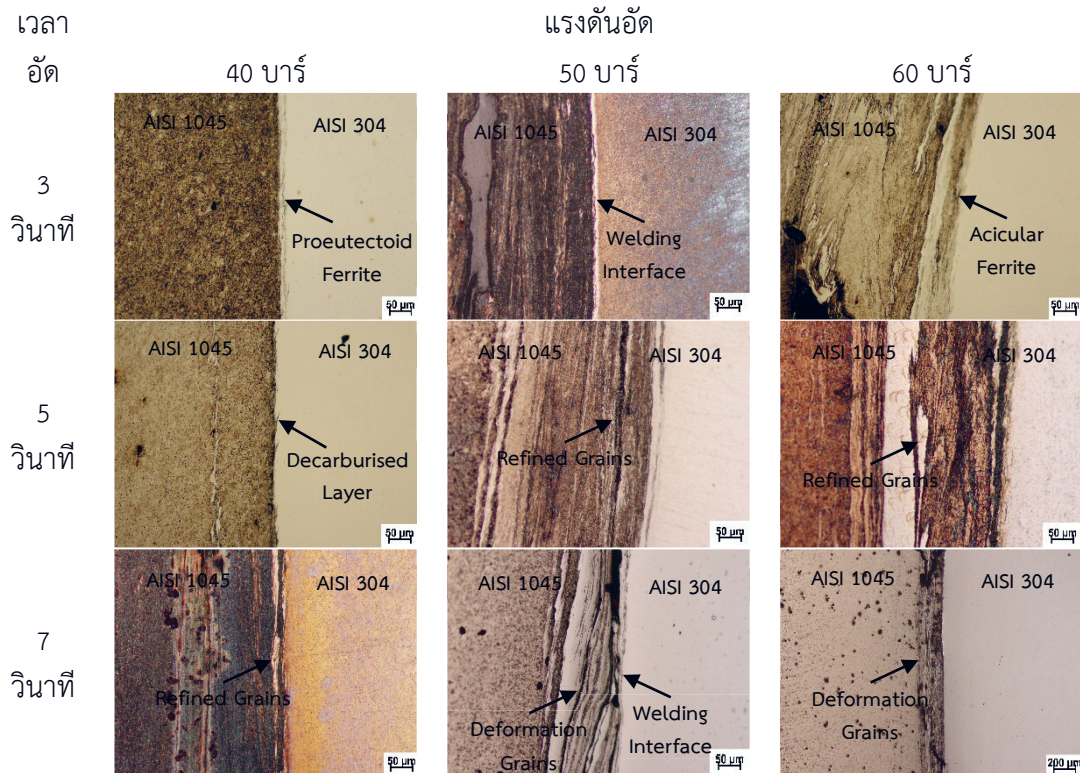
รูปที่ 3 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

3.3. โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคที่ส่วนรอยเชื่อมแตกต่างกันไปตามแนวรัศมีของชิ้นงานทรงกระบอก ในบริเวณ FPDZ รอยเชื่อมสามารถชี้จุดของวัสดุได้ง่ายเนื่องจากเหล็กกล้า

คาร์บอน (AISI 1045) และเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) จะถูกแบ่งโดยแนวการเชื่อมประสาน (Welding Interface) ในบริเวณ DZ เหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) เกิดการเสียรูปร่างของเกรนเนื่องจากการ

เสียรูปเชิงพลาสติกที่มีความรุนแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณ HAZ [23] นอกจากนี้ในรอยเชื่อมมีการเกิดขึ้นของชั้นโปรยูเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ (Proeutectoid Ferrite) บาง ๆ และอยู่ใกล้กับรอยเชื่อมในบริเวณ FPDZ สาเหตุเกิด

จากการเกิดขึ้นของความร้อนด้วยปัจจัยของการเชื่อม คือ แรงดันอัด และเวลาอัด ซึ่งมีอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมเสียดทานในบริเวณ DZ ระหว่าง 727-1493 องศาเซลเซียส (°C) [20]



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

พื้นที่โครงสร้างจุลภาคมีความแตกต่างในปัจจัยการเชื่อมเสียดทานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อเพิ่มแรงดันอัดมากขึ้น รอยเชื่อมบริเวณ FPDZ มีความกว้างมากขึ้น ส่วนในบริเวณ DZ มีพื้นที่ลดลง ปรากฏการณ์นี้เกิดจากข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันอัดมากขึ้น ทำให้วัสดุเกิดอุณหภูมิสูงมากขึ้นซึ่งนำไปสู่การลดลงของบริเวณ DZ ที่มากขึ้น นอกจากนี้แรงดันอัดมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น วัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่านั้น ทำให้เกิดการเสียรูปเชิงพลาสติกที่มากกว่า [24]

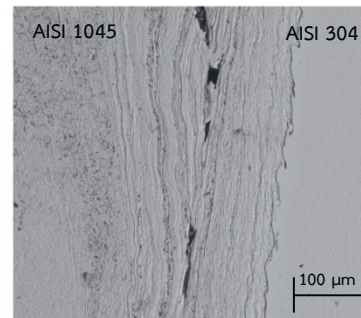
เส้นแนวการเชื่อมประสาน (Welding Interface) จะได้เห็นว่าเป็นเส้นแบ่งระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) อย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดขึ้นของชั้น Proeutectoid Ferrite บาง ๆ ปรากฏขึ้นเนื่องจากการแพร่ของธาตุแบบเข้มข้นโดยเฉพาะคาร์บอน ในบริเวณ DZ เกิดปรากฏการณ์การลดลงของความร้อนอย่างรวดเร็วหลังจากที่อุณหภูมิสูงที่เกิดจากปัจจัยการเชื่อม

การเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกของกระบวนการเชื่อมเสียดทานมีผลเนื่องมาจากความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นในของบริเวณ DZ ทำให้ Ferrite บางตัวอยู่ในรูปเข็ม โครงสร้างดังกล่าวเรียกว่า Acicular Ferrite สำหรับด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ของวัสดุทดลองเกิดจากการตกผลึกแบบพลวัตของเกรน Austenite ซึ่งส่งผลในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงขึ้น Refined Grains เนื่องมาจากการแพร่กระจายของคาร์บอนจากด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) ไปยังด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) และความแข็งแรงลดลง และอาจนำไปสู่การแตกหักที่บริเวณ DZ ของด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ลักษณะการเช่นนี้มีผลคล้ายกันกับ Ma H และคณะ [25]

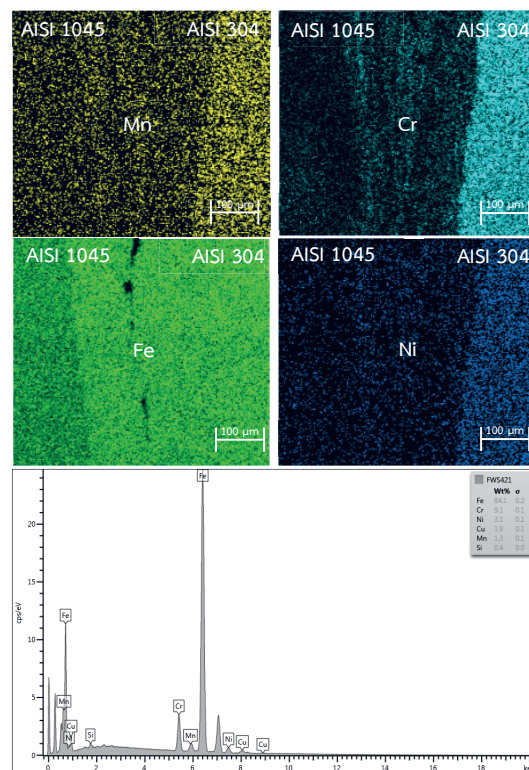
โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อมที่เวลาอัด 3 วินาที และแรงดันอัด 40 บาร์ ดังรูปที่ 5 พบว่า การเกิดขึ้นของเฟส δ - Ferrite ประการแรกเป็นเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ดังนั้นจึงสามารถพบเฟส δ - Ferrite จำนวนมากได้ที่รอยต่อเชื่อมที่อุณหภูมิสูงสุด โดยทั่วไปในรอยเชื่อมของวัสดุที่คล้ายกัน [23, 26-28] เนื่องจากค่าการนำความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) นั้นสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) และประการที่สองเฟสตั้งต้นของ Ferrite ในเนื้อวัสดุเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) สามารถตกตะกอนได้ภายใต้อิทธิพลของความร้อนและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก การสลายตัวของ δ - Ferrite คือ การสลายตัวของยูเทคตอยด์ (Eutectoid) [29]

การทำแผนที่องค์ประกอบ X-ray สำหรับองค์ประกอบอนุภาคของ แมงกานีส (Mn) โครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) และ นิกเกิล (Ni) ผสมผสาน

(Interface) ของรอยเชื่อมที่กระทำด้วยสภาวะความดันในการอัด 40 บาร์ การปรากฏนี้ค่อนข้างชัดเจนและสอดคล้องกันด้วยการสแกนอนุภาค ดังรูปที่ 6 พบว่าในบริเวณรอยเชื่อมจะพบอนุภาคของ Mn Cr และ Ni กระจุกกระจายทั่วบริเวณ เนื่องมาจากกระบวนการเชื่อมเสียดทาน



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อม



รูปที่ 6 EDX ของรอยเชื่อมที่ความดันในการอัด 40 บาร์ และเวลาในการอัด 3 วินาที

โดยเฉพาะอนุภาค Cr จะเห็นได้ชัดว่า มีการแทรกตัวเข้าไปในฝั่งของด้านเหล็กกล้า คาร์บอน (AISI 1045) เนื่องมาจากกระบวนการ เชื่อมเสียดทาน และบริเวณความหนาแน่นของ อนุภาค Fe จะมีมากในด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) และมีน้อยลงในด้านเหล็กกล้าไร้ สนิม (AISI 304) ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนผสมทาง เคมีของวัสดุทั้งสองนั่นเอง

3.4. ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง ของรอยเชื่อมเสียดทาน เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ซ้ำ 9 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2

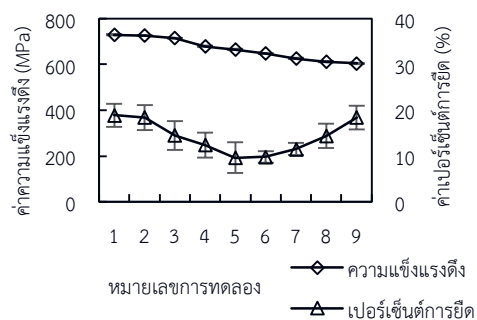
ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

หมายเลขการ ทดลอง	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความเค้นคราก (MPa)	การยืดตัว (%)
1	729.8	518.8	18.9
2	726.1	469.1	18.4
3	715.3	630.6	14.5
4	678.9	484.1	12.4
5	665.0	470.0	9.6
6	647.9	578.3	9.8
7	625.8	561.3	11.5
8	611.8	494.6	14.4
9	605.2	570.6	18.4
AISI 1045 (BM)	712.38	460.12	13.89
AISI 304 (BM)	809.59	741.67	27.78

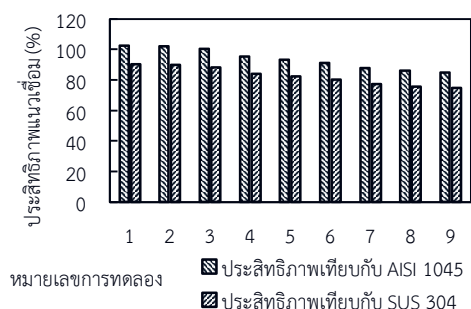
ความแข็งแรงดึงและการยืดตัวใน ปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกัน บ่งชี้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ ดีระหว่างสมบัติความแข็งแรงดึงและปัจจัยการเชื่อม ด้วยแรงเสียดทาน การเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานที่ ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัว ซึ่งมี อิทธิพลมาจากปัจจัยแรงดันอัดและเวลาอัด ดังนั้น แรงดันอัดและเวลาอัดที่เพียงพอ และแรงเสียดทานที่ เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปรับปรุง สมบัติทางกลของรอยเชื่อม สำหรับรูปแบบของความ แข็งแรงดึงและการยืดตัวที่มีแรงดันอัดไม่เหมาะสม จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มขึ้นแรงดันอัด สิ่งนี้ชี้ให้เห็น

ว่าแรงดันอัดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง สำหรับการศึกษานี้

ผลกระทบของแรงดันอัดที่ส่งผลต่อ ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 7 (ก) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอัดทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงดึงในรอยเชื่อม โดยมี ค่าความแข็งแรงดึงลดลง เมื่อผลกระทบของแรงดัน อัดเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 605.2 เมกะปาสคาล (MPa) ที่แรงดันอัด 60 บาร์ และเวลาอัด 7 วินาที ส่วนค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 729.8 เมกะปาสคาล ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และเวลาอัด 3 วินาที ยิ่งไปกว่านั้นรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึง สูงสุดยังแสดงถึงเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ดีที่สุด โดยมี ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งบ่งชี้ว่า รอยเชื่อมสามารถรองรับค่าความแข็งแรงสูงและ ความเหนียวได้ดี



(ก) ค่าความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทาน



(ข) ประสิทธิภาพแนวเชื่อม

รูปที่ 7 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

นอกจากนี้ประสิทธิภาพรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม ดังรูปที่ 7 (ข) ปัจจัยที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มีค่าเท่ากับ 102.4 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีค่าเท่ากับ 90.1 เปอร์เซ็นต์

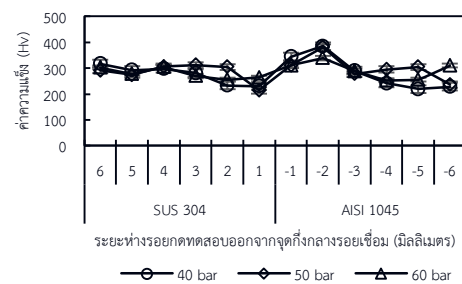
โดยทั่วไปแรงดันสูงส่งผลให้มีความเหนียวและความแข็งแรงดึงสูง แต่ถ้าชิ้นงานมีโครงสร้างที่ละเอียดมีความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวต่ำในขณะที่โครงสร้างจุลภาคหยาบมีแนวโน้มย้อนกลับ [19] จุดขาดของการทดสอบความแข็งแรงดึงจะพบที่บริเวณ FPDZ และบริเวณ DZ ใกล้กับรอยเชื่อม ปัจจัยของการ บ่งชี้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างสมบัติความแข็งแรงดึงกับปัจจัยของการเชื่อมเสียตทาน แรงดันอัดและเวลาอัด เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยประกอบอื่น ๆ ที่มีส่วนร่วมต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของรอยเชื่อม คือ เวลาเสียตทานที่เพียงพอและแรงดันเสียตทานที่เหมาะสมก็มีความสำคัญเช่นกัน วัสดุทั้งสองถูกเชื่อมติดกันอย่างแน่นหนาเนื่องจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกที่มีปริมาณเพียงพอและมีช่วงอุณหภูมิที่ 780-800 °C เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการเชื่อมนี้ ยิ่งไปกว่านั้นที่อุณหภูมิในรอยเชื่อมต่ำจะทำให้วัสดุทั้งสองชนิดมีความเครียดที่สูงและมีการเพิ่มขึ้นของการตกผลึกของเกรนแบบพลวัต [30]

3.5. ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมเสียตทาน แสดงดังรูปที่ 8 - 10

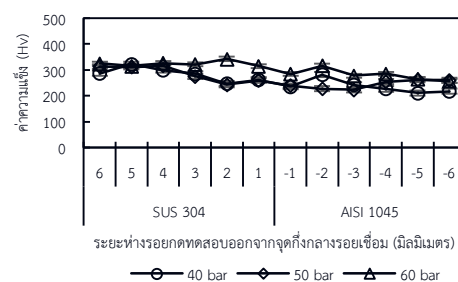
3.5.1 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 3 วินาที ดังรูปที่ 8 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 385.3 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยน้อยสุดเท่ากับ 219.7 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์

3.5.2 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 5 วินาที ดังรูปที่ 9 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 342.7 HV ที่แรงดันอัด 60 บาร์ และค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยน้อยสุดเท่ากับ 211.1 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์

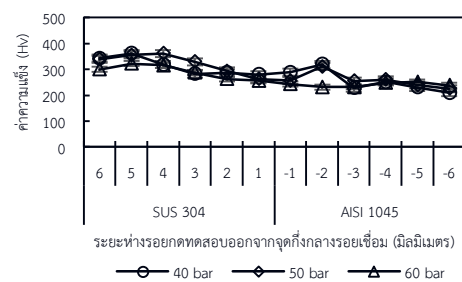
3.5.3 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 7 วินาที ดังรูปที่ 10 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 362.1 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยน้อยสุดเท่ากับ 209.3 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์



รูปที่ 8 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 3 วินาที



รูปที่ 9 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 5 วินาที



รูปที่ 10 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 7 วินาที

ค่าความแข็งมีการปรับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดมากขึ้น จากข้อสังเกตในสภาวะของเวลาอัดที่ 3 และ 5 วินาที ซึ่งเกิดจากการการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกที่เพิ่มขึ้น [31] นอกจากนี้เมื่อแรงดันอัดเพิ่มขึ้นทำให้วัสดุทั้งสองด้านมีค่าความแข็งลดลง ปรากฏการณ์นี้เกี่ยวข้องกับบริเวณ DZ ที่สั้นลงภายใต้แรงดันอัดที่สูงขึ้น [20]

ค่าความแข็งใกล้บริเวณรอยเชื่อมจะมีค่าสูงและลดลงไปตามค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะเดิม ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากแรงดันที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งลดลงเมื่อเพิ่มเวลาดันมากเกินไป ค่าความแข็งสูงสุดที่ได้รับในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเชื่อม [19] ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้จากการก่อตัวของมาร์เทนไซต์ที่รอยเชื่อมที่ถูกสร้างขึ้นเนื่องจากวัสดุได้รับความร้อนและการระบายความร้อนอย่างรวดเร็วในระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียหายน การก่อตัวของมาร์เทนไซต์จะทำให้ลดสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียหายน แต่อย่างไรก็ตามก็จะถูกควบคุมโดยปัจจัยของการเชื่อม จากผลการทดลองค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดในบริเวณรอยเชื่อมเท่ากับ 209.3 HV ที่เวลาอัด 7 วินาที และแรงดันอัด 40 บาร์ และค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดในบริเวณรอยเชื่อมเท่ากับ 756.1 HV ที่เวลาอัด 7 วินาที และแรงดันอัด 60 บาร์

4. สรุปผลการทดลอง

4.1. การเกิดครีปของรอยเชื่อม (Weld Flashes) มีขนาดมากขึ้นเมื่อมีแรงดันอัดสูงขึ้น และน้อยลงเมื่อมีแรงดันอัดต่ำลง

4.2. โครงสร้างบริเวณ FPDZ มีลักษณะเป็นเกรนละเอียด การจัดเรียงตัวเป็นแถวในทิศทางหมุนเดียวกันที่มีผลมาจากความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด และเวลาอัดของการเชื่อมเสียหายน

4.3. ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 729.8 เมกะปาสคาล ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และเวลาอัด 3 วินาที

4.4. ค่าความแข็ง มีอิทธิพลมาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอัด เมื่อแรงดันอัดสูงขึ้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของรอยเชื่อมสูงสุดเท่ากับ 756.1 HV ที่แรงดันอัด 60 บาร์ และเวลาอัด 7 วินาที

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ananthapadmanaban D, Rao VS, Abraham N, Rao KP, A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints. Mater Design. 2009;30(7):2642-6.
- [2] Hong M, Guoliang Q, Peihao G, Fei L, Xiangmeng M, Banglong F, Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint of carbon steel to stainless steel. J Mater Process Tech. 2016;227:24-33.
- [3] Tavares SSM, Fruchart D, Miraglia S, A magnetic study of the reversion of martensite α' in a 304 stainless steel. J Alloy Compd. 2000;307(1-2):311-7.
- [4] Sahin M, Characterization of properties in plastically deformed austenitic-

- stainless steels joined by friction welding. *Mater Design*. 2009;30(1): 135-144.
- [5] Guilong W, Jinglong L, Jiangtao X, Wei Z, Fusheng Z, Study on microstructure evolution of AISI 304 stainless steel joined by rotary friction welding. *Weld World*. 2018;62(6):1187-93.
- [6] Sathiya P, Aravindan S, Haq, AN, Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints. *Mater Design*. 2008;29(6):1099-109.
- [7] Kimura M, Inoue H, Kusaka M, Kaizu K, Fuji A, Analysis Method of Friction Torque and Weld Interface Temperature during Friction Process of Steel Friction Welding. *J Solid Mech Mater*. 2010;4(3):401-13.
- [8] Uday MB, Ahmad Fauzi, MN, Zuhailawati H, Ismail AB, Advances in friction welding process: a review. *Sci Technol Weld Join*. 2010;15(7):534-58.
- [9] Sahin M, Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Mater Design*. 2007;28(7):2244-50.
- [10] Kurt B, The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples. *J Mater Process Tech*. 2007;190(1-3): 138-41.
- [11] Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Temple-Smith P, Dawes CJ, Friction stir butt welding. Patent. 1991 ;No. PCT/GB92/02203.
- [12] Sketchley PD, Threadgill PL, Wright IG, Rotary friction welding of an Fe3Al based ODS alloy. *Mater Sci Eng A*. 2002;329-331:756-62.
- [13] Bhamji I, Preuss M, Thradgill PL, Addison AC, Solid state joining of metals by linear friction welding : a literature review. *Mater Sci Tech*. 2011;27(1):2-12.
- [14] Alberti N, Fratini L, Friction stir welding: a solid state joining process. *Adv Mech Mater*. 2005;486:67-86.
- [15] Sahin M, Friction welding of different materials, *Inter Scien Con. Gabrovo, Bulgaria*, 2010;131-34.
- [16] Shubhavardhan RN, Surendran S, Friction welding to join dissimilar metals. *Int J Emer Tech Adv Eng*. 2012;2:200-10.
- [17] Sahinh M, Joining of stainless-steel and aluminium materials by friction welding. *Int J Adv Manuf Tech*. 2009;41(5-6):487-97.
- [18] Ambroziak A, Korzeniowski M, Kustron P, Winnicki M, Sokolowski P,

- Harapinska E, Friction welding of aluminium and aluminium alloys with steel, *Adv Mater Sci Eng*. 2014;1-15.
- [19] Satyanarayana VV, Madhusudhan RG, Mohandas T, Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. *J Mater Process Tech*. 2005;160(2):128-37.
- [20] Ma H, Qin G, Geng P, Li F, Fu B, Meng X, Microstructure characterization and properties of carbon steel to stainless steel dissimilar metal joint made by friction welding. *Mater Des*. 2015;86:587-97.
- [21] Mumin S, Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *J Mater Process Tech*. 2005;168:202-10.
- [22] Gawhar IK, Sherko AB, Efficiency of dissimilar friction welded 1045 medium carbon steel and 316L austenitic stainless steel joints, *J mater res technol*. 2019;Article in Press.
- [23] Ji S, Liu J, Yue Y, Lu Z, Fu L, 3D numerical analysis of material flow behavior and flash formation of 45# steel in continuous drive friction welding, *Trans Nonferrous Metals Soc China*. 2012;22:s528-s33.
- [24] Li P, Li J, Salman M, Liang L, Xiong J, Zhang F, Effect of friction time on mechanical and metallurgical properties of continuous drive friction welded Ti6Al4V/SUS321 joints. *Mater Des*. 2014;56:649-56.
- [25] Ma H, Qin G, Geng P, Li F, Meng X, Fu B, Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint of carbon steel to stainless steel. *J Mater Process Technol*. 2016;227:24-33.
- [26] Li W, Wang F, Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Mater Sci Eng A*. 2011;528:5921-26.
- [27] Bhamji I, Preuss M, Threadgill PL, Moat RJ, Addison AC, Peel MJ, Linear friction welding of AISI 316L stainless steel. *Mater Sci Eng A*. 2010;528:680-90.
- [28] Das S, Mukherjee M, Pal TK, Effect of grain boundary precipitation and δ -ferrite formation on surface defect of low nickel austenitic stainless steels. *Eng Fail Anal*. 2015;54:90-102.
- [29] Lee KM, Cho HS, Choi DC, Effect of isothermal treatment of SAF 2205 duplex stainless steel on migration of δ/γ interface boundary and growth of

austenite. J Alloys Compd. 1999;
285(1):156-61.

- [30] Mirzadeh H, Roostaei M, Parsa MH, Mahmudi R, Rate controlling mechanisms during hot deformation of Mg-3 Gd-1 Zn magnesium alloy: Dislocation glide and climb, dynamic recrystallization, and mechanical twinning. Mater Des. 2015;68:228-31.
- [31] Moteshakker A, Danaee I, Moeinifar S, Ashrafi A, Hardness and tensile properties of dissimilar welds joints between SAF 2205 and AISI 316L. Sci Technol Weld Join. 2016;21:1-10.