วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ
ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2566

อิทธิพลของปัจจัยสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA5083 กับ AA6061 โดยมีวัสดุเสริมแรงในแนวเชื่อม

Influence Of Factors for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys AA5083 and AA6061 With Reinforcing Material in The Weld Line

รุ่งวสันต์ ไกรกลาง[1] ฉกาจ เชื่อดี[1] สุรพจน์ วัชโรภากุล[1] สุรัตน์ วรรณศรี[1] ภูมิสิทธิ์ สันดี[1] และ ธนศักดิ์ รัตนพุทธพิบูล[1*]
[1]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
Rungwasun Kraiklang[1] Chakat Chueadee[1] Suraphot Watcharophakul[1] Surat Wannasri[1]
Poomsit Sandee[1] and Thanasak Rattanapoottapiboon[1*]
[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan
Corresponding author Email: Thanasak.ra@rmuti.ac.th[*]
(Received: August 22, 2023; Revise: December 16, 2023; Accepted: December 18, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสำหรับการเติมอนุภาคสารเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ในแนวเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด AA5083 กับอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม-ซิลิกอนเกรด AA6061 เพื่อเป็นแนวทางเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึงในแนวเชื่อม กำหนดปัจจัยแปรผันคือความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 800, 1,000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 15, 30 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม และปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยที่ปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานสูงที่สุด รองลงมาคือปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม โดยเมื่อเพิ่มปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมสูงขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่สูงขึ้นตาม ขณะที่เมื่อลดปัจจัยความเร็วเดินเชื่อมลงจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่สูงขึ้น ระดับปัจจัยที่ส่งผลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานดีที่สุดของการทดลองนี้ คือความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 15 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดคือ 211.63 MPa

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน อนุภาคสารเสริมแรง ค่าความต้านทานแรงดึง

Abstract

This research intended to explore the influence of parameters for filling of silicon carbide reinforced particles in the weld line for friction stir welding of aluminum alloy AA5083 and AA6061 as a guideline for enhancing the tensile strength in the weld line. Determining the variables were the tool rotation speed of 800, 1,000 rpm and the welding speed of 15, 30 mm/min. Statistical analysis showed that the tool rotation speed and welding speed significantly influenced the tensile strength at 0.05 level. The tool rotation speed had the

highest influence on the tensile strength of the workpiece followed by the welding speed. Increasing the tool rotation speed will result in higher tensile strength of the workpiece, while decreasing the welding speed will result in higher tensile strength of the workpiece. The best factor affecting the tensile strength of the workpiece in this experiment was the tool rotation speed of 1,000 rpm and the welding speed of 15 mm/min., the highest tensile strength is 211.63 MPa.

Keywords: Friction Stir Welding, Reinforcement Particles, Tensile Strength

1. บทนำ

1.1 ที่มาความสำคัญของงานวิจัย

อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ต้านทานต่อการกัดกร่อนและมีการนำความร้อนที่ดี รวมถึงมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงกว่าเหล็กกล้า สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีราคาถูก หาได้ง่ายตามท้องตลาด จึงนิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการพาณิชย์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์ อะลูมิเนียมอัลลอยจะถูกนำมาใช้ทดแทนเหล็กกล้าเพิ่มมากขึ้นเฉลี่ยในอัตราร้อยละ 11-12 ต่อปี จากการที่ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตรถยนต์ที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก อะลูมิเนียมอัลลอยโดยเฉพาะกลุ่ม 5xxx และ 6xxx ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในยานยนต์อย่างกว้างขวาง เช่น ตัวโครงรถ ฝากระโปรงรถ และประตูรถ การเชื่อมประกอบชิ้นส่วนเหล่านี้ ส่วนใหญ่ใช้วิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Weld) ซึ่งมีข้อจำกัดและเกิดปัญหาหลังการเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิด ที่มีความยุ่งยากของการเลือกลวดเชื่อม เกิดการบิดงอแตกร้าว ความเค้นตกค้างสูง เกิดจุดบกพร่องหรือตำหนิในแนวเชื่อม โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เนื่องมาจากอุณหภูมิของบ่อหลอมที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมสูงมาก เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนภายในโครงสร้าง จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมลดลง โดยเฉพาะความต้านทานแรงดึง จึงไม่สามารถที่จะเชื่อมเข้าด้วยกันได้ด้วยวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายด้วยกระบวนการทางความร้อน ได้

วิธีการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็งด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding ; FSW) โดย Wayne Thomas ในปี ค.ศ 1991 จากสถานบันการเชื่อมของอังกฤษ ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาต่างๆ จากการเชื่อมแบบหลอมละลาย โครงสร้างของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีลักษณะเกรนที่เล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไปไม่สามารถทำได้ [1] วิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะไม่ก่อให้เกิดสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และสามารถเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดกันได้ดี จากข้อดีข้างต้นจึงทำให้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นที่ยอมรับกันในวงการอุตสาหกรรมของต่างประเทศ เช่น ในอดีตมีการเชื่อมต่อชนระหว่าง AA5083 และ AA6061 พบว่าตัวแปรแนวเชื่อมที่เหมาะสมที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 200 MPa คือความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 10 มิลลิเมตร/นาที [2] อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดกันยังประสบปัญหาของความแข็งแรงของแนวเชื่อมหลังการเชื่อมที่ได้ยังต่ำกว่าวัสดุฐาน อาจเป็นผลจากพารามิเตอร์การเชื่อมไม่สัมพันธ์กัน ส่งผลต่อความร้อนจากการเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม ทำให้การเสียรูปแบบพลาสติกและการผสมผสานของเนื้อวัสดุไม่เพียงพอหรือมากเกินไปภายในโครงสร้างแนวเชื่อม และถึงได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วความแข็งแรงแนวเชื่อมก็ยังไม่แข็งแรงเท่ากับวัสดุฐานอยู่ดี และจากรายงานในอดีตที่ผ่านมานั้นยังไม่มีการศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงแนวเชื่อมด้วยอนุภาคผงเสริมแรง มีเพียงการเพิ่มความแข็งแรงให้กับแนวเชื่อมด้วยกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนเท่านั้น ดังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด 5083 และเกรด 6061 แนวเชื่อมมีความแข็งแรงลดลงเฉลี่ยถึง 29% ของอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061 จากการที่โครงสร้าง

แนวเชื่อมเกิดจุดบกพร่อง รวมถึงยังพบไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันบางส่วนภายในโครงสร้าง ถึงแม้ว่าจะมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแล้วก็ตาม [3, 4] ประกอบกับเคยมีการศึกษาวิธีการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเสริมแรงด้วยอนุภาคผงเสริมแรงภายในเนื้อวัสดุให้เป็นวัสดุอะลูมิเนียมเชิงประกอบพบว่าการเสริมแรงด้วยอนุภาคผงเสริมแรงสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้เพิ่มสูงขึ้นได้ [5] โดยอนุภาคผงที่เติมนิยมใช้กลุ่มคาร์ไบด์และออกไซด์ เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide : SiC), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide : Al_2O_3) เป็นต้น ดังนั้นวิธีการที่สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแนวเชื่อมให้ใกล้เคียงกับโลหะพื้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยการใช้อนุภาคผงเสริมแรงให้กับแนวเชื่อม เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่เพิ่มความแข็งและความต้านทานแรงดึงได้

ด้วยเหตุนี้จึงได้สนใจนำประเด็นนี้มาเป็นปัญหาในการศึกษาวิจัยการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม AA5083 กับ AA6061 ด้วยเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ลักษณะแบบการต่อชน (Butt-Joint) พร้อมกับเจาะรูเติมอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 18 ไมครอน เข้าไปผสมเพื่อเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบในแนวการเชื่อมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในแนวเชื่อม ซึ่งอะลูมิเนียมผสมเนื้อพื้นที่ใช้เป็นเกรดที่มีความนิยมใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม และเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการเชื่อมต่ออะลูมิเนียม ประกอบกับในประเทศไทยยังมีข้อมูลอ้างอิงในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมด้วยเทคนิคนี้น้อยมาก จึงควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อเป็นแนวทางที่จะนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

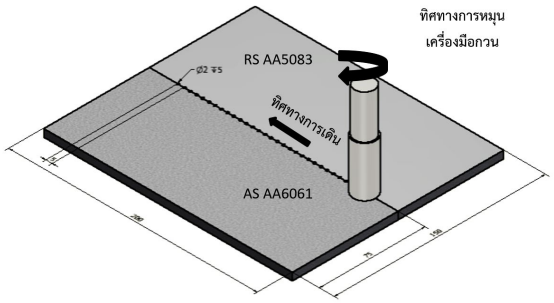
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, UTS) ของชิ้นงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุอะลูมิเนียมผสม AA5083 และAA6061 ที่เสริมความแข็งแรงด้วยการเจาะรูเติมอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์

2. การดำเนินการทดลอง

2.1 เตรียมวัสดุอุปกรณ์

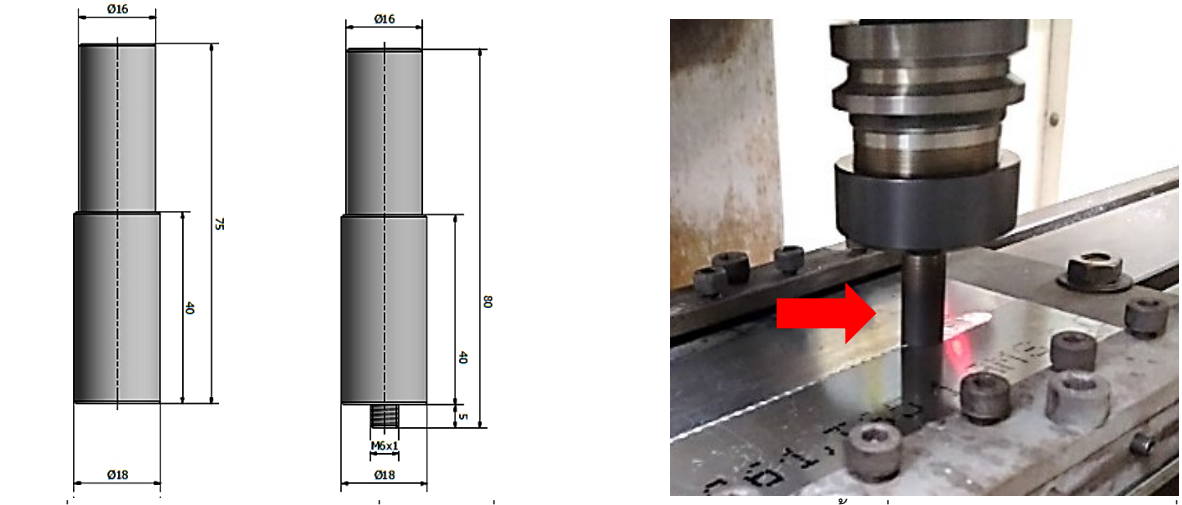
1) วัสดุทดลองคืออะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 และ AA6061 ตัดให้ได้ขนาดตามแบบคือ ขนาดความกว้าง 75 x 200 x 6 มิลลิเมตร แล้วประกบกันเพื่อเจาะรูเป็นแถวเส้นตรงตามแนวประกบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างรู 5 มิลลิเมตร จำนวน 29 รูต่อแถว เพื่อให้ได้ปริมาตรสัดส่วนอนุภาคผงเสริมแรง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเตรียมแผ่นอะลูมิเนียม AA5083 และ AA6061

2) อนุภาคผงสารเสริมแรงที่ใช้เป็นซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide : SiC) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย18 ไมครอน

3) เครื่องมือที่ใช้เดินกวน เป็นวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด DC53 ผ่านการชุบแข็งแล้วมีความแข็งเฉลี่ย 60 - 62 HRC ขึ้นรูป 2 รูปแบบ คือ เครื่องมือที่ใช้กวนปิดรูที่มีเฉพาะบ่าเครื่องมือมีขนาดความโตบ่าเครื่องมือ 18 มิลลิเมตร ใช้สำหรับกวนปิดหน้ารูเจาะเติมอนุภาคผงก่อนทำการเดินเชื่อม (รูปที่ 2ก) และเครื่องมือที่ใช้เดินเชื่อมจะเพิ่มหัวสำหรับกวนแนวเชื่อมตรงปลายบ่าเครื่องมือโดยขึ้นรูปเป็นเกลียวเมตริกขนาด M6x1 ยาว 5 มิลลิเมตร (รูปที่ 2ข) โดยติดตั้งเครื่องมือที่หัวจับงานเครื่องกัด (รูปที่ 2ค)



ก) เครื่องมือปิดหน้ารูเจาะ ข) เครื่องมือเดินเชื่อม ค) ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือปิดหน้ารูเจาะและเดินเชื่อม

รูปที่ 2 เครื่องมือเชื่อม

2.2 การออกแบบการทดลอง

เบื้องต้นคณะผู้จัดทำได้ทดลองหาค่าพารามิเตอร์แปรผันด้านความเร็วรอบเครื่องมือและความเร็วเดินเชื่อมจากการทดลองเบื้องต้น พบว่าค่าระดับพารามิเตอร์ที่สามารถเชื่อมติดกันได้ดี มีความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมอยู่ในช่วง 800-1000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อมอยู่ในช่วง 15-30 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นนำค่าระดับพารามิเตอร์ทั้งสองมาใช้ออกแบบการทดลองสำหรับการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด AA5083 กับ AA6061 ที่เสริมแรงแนวเชื่อมด้วยอนุภาคผงเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ การกำหนดปัจจัยคงที่อ้างอิงจากจากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ประกอบด้วยปัจจัยมุมเอียงเครื่องมือ ความลึกกดเสียดทาน เวลากดเสียดทาน รูปทรงเครื่องมือ และอัตราส่วนของขนาดบ่าเครื่องมือต่อขนาดของหัวพิน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดปัจจัยคงที่

ปัจจัย	ค่าระดับ	อ้างอิง
มุมเอียงเครื่องมือ	0°	[6]
ความลึกกดเสียดทาน	0.5 มม.	[7, 8]
เวลากดเสียดทาน	30 วินาที	[9]
รูปทรงเครื่องมือ	เกลียวทรงกระบอก	[10, 11]
อัตราส่วนของขนาดบ่าเครื่องมือต่อหัวพิน	3 : 1	[9,12]

ส่วนแสดงเงื่อนไขการทดลองและระดับปัจจัยแปรผันในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขทดลอง และระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัยการทดลอง	หน่วย	ระดับปัจจัย	
		ต่ำ (-1)	สูง (+1)
ความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม (S)	รอบ/นาที	800	1000
ความเร็วเดินเชื่อม (F)	มม./นาที	15	30

ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล เต็มรูปแบบชนิด 2^k (Full factorial 2^k) โดยกำหนดให้มีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยตัวแปรตามหรือผลตอบสนองที่ต้องการทราบเป็นค่าความต้านทานแรงดึง

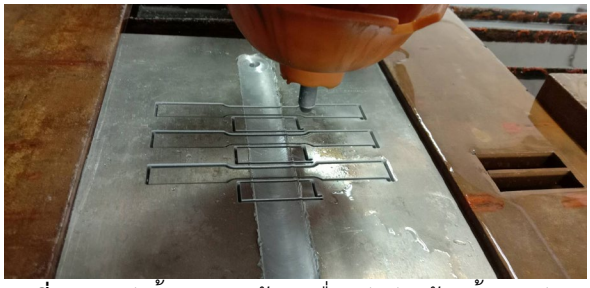
2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ดำเนินการทดลองตามเงื่อนไขในตารางการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบชนิด 2^k ด้วยการจับยึดชิ้นงานบนอุปกรณ์จับยึด (Fixture) และใช้เครื่องกัดตั้งระบบอัตโนมัติ และใช้เครื่องกัดตั้งระบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ HAAS รุ่น TM2 ในการเดินเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 ทดลองเชื่อมชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนด

2.4 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบสมบัติ

หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ตามแผนการทดลองครบทุกเงื่อนไขแล้ว จะนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ไปตัดชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบโครงสร้างจุลภาค และชิ้นส่วนทดสอบแรงดึง ตามขนาดมาตรฐาน ASTM E8M แสดงรูปร่างการตัดชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4 ด้วยเครื่องตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงยี่ห้อ MAXIEM Waterjet รุ่น 1530 ซึ่งเป็นการตัดด้วยเครื่องดังกล่าวมีจุดเด่นคือ สามารถตัดงานที่มีขนาดเที่ยงตรง ไม่เกิดความร้อนขณะตัดเฉือน



รูปที่ 4 การตัดชิ้นทดสอบด้วยเครื่องตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง

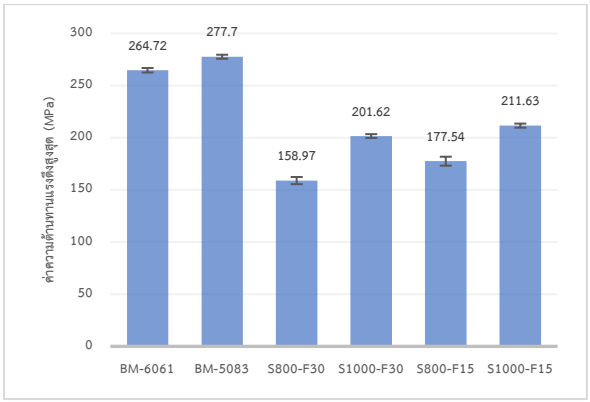
นำชิ้นทดสอบแรงดึงไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ LLOYD รุ่น LS100 Plus ขนาด 100 กิโลนิวตัน และทำการดึงด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องจนชิ้นงานขาด ทำการบันทึกค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

ชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค จะนำชิ้นงานมาขัดผิวภาคตัดขวางด้านแนวเชื่อม เตรียมพื้นผิวสำหรับส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX 60 เพื่อตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากการขึ้นรูป และดูลักษณะการกระจายของอนุภาคสารเสริมแรง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลค่าความต้านทานแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงจากการทดลองตามแผนการทดลองจำนวน 4 เงื่อนไข ทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำมาเปรียบเทียบกับค่าวัสดุฐาน (Base Material) ได้ผลดังกราฟในรูปที่ 5

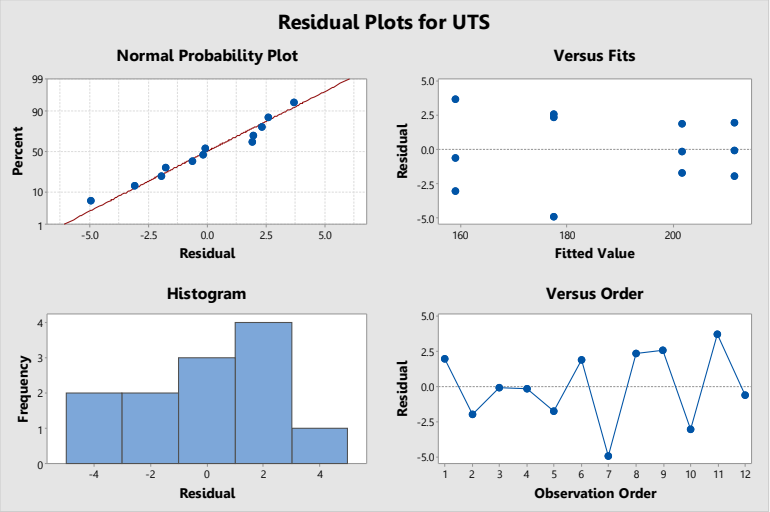


รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงแต่ละเงื่อนไข

พบว่าชิ้นงานในเงื่อนไข S1000-F15 คือความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 1000 รอบต่อนาที กับความเร็วเดินเชื่อม 15 มิลลิเมตรต่อนาที จะมีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด เฉลี่ยที่ 211.63 MPa และชิ้นงานในเงื่อนไข S800-F30 คือความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 800 รอบต่อนาที ความเร็วรอบกวน 30 มิลลิเมตรต่อนาที จะได้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดเฉลี่ยที่ 158.97 MPa

3.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความต้านทานแรงดึง

ก่อนทำการทดสอบสมมติฐานถึงอิทธิพลปัจจัยต่อความต้านทานแรงดึง ต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองที่สมมุติฐานว่าค่าเศษเหลือ (Residual) ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องเป็นไปตามหลักการ คือ ค่าเศษเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ มีความแปรปรวนเท่ากัน และมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การวิเคราะห์รูปแบบของค่าเศษเหลือของค่าความต้านทานแรงดึงในภาพรวมแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวิเคราะห์รูปแบบของค่าเศษเหลือ

จากรูปที่ 6 ความน่าจะเป็นปกติ (Normal probably plot) พบว่ากราฟว่ามีลักษณะของข้อมูลเป็นเส้นตรง แสดงว่าค่าเศษเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ และเส้นตรงไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น และกราฟบนขวา แสดงการกระจายตัวของค่าเศษเหลือกระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน แสดงว่าค่าเศษเหลือมีความแปรปรวนพอ ๆ กัน สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ต่อได้ดังนี้

Factorial Regression: UTS versus Rotation Speed, Traveling Speed

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	5084.99	1695.00	181.01	0.000
Linear	2	5029.91	2514.95	268.58	0.000
Rotation Speed	1	4417.15	4417.15	471.72	0.000
Traveling Speed	1	612.76	612.76	65.44	0.000
2-Way Interactions	1	55.08	55.08	5.88	0.041
Rotation Speed*Traveling Speed	1	55.08	55.08	5.88	0.041
Error	8	74.91	9.36		
Total	11	5159.90			

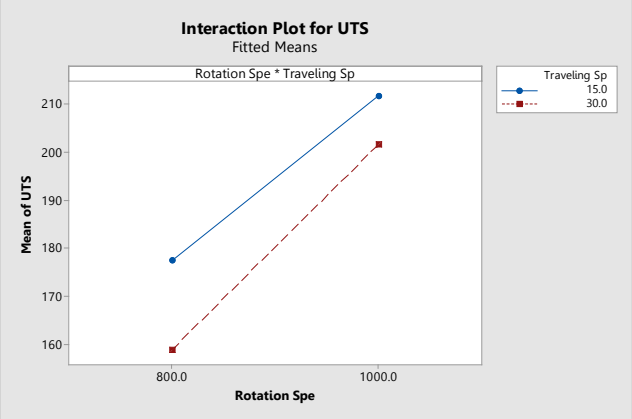
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.06004	98.55%	98.00%	96.73%

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความต้านทานแรงดึงพบว่า ปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย คือปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม และปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง และปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมกับปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าความต้านทานแรงดึงด้วย

เนื่องจากปัจจัยร่วมทั้ง 2 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จึงพิจารณากราฟ Interaction Plot ดังรูป

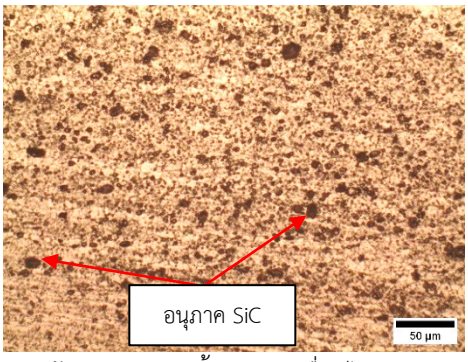


รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ Interaction Plot

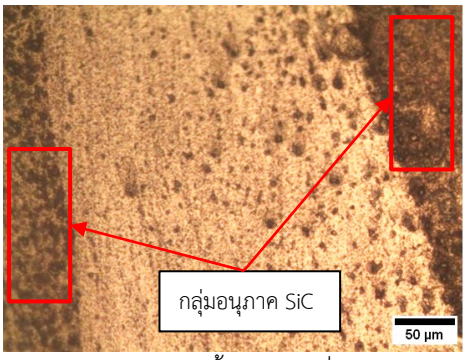
จากกราฟดังรูปที่ 8 พบว่าเมื่อเพิ่มปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมสูงขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่สูงขึ้นตาม ขณะที่เมื่อลดปัจจัยความเร็วเดินเชื่อมลง จะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่สูงขึ้น โดยระดับปัจจัยที่ส่งผลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่สูงที่สุดของการทดลองนี้คือ คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 1000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 15 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนระดับปัจจัยที่ส่งผลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ต่ำที่สุดของการทดลองนี้คือ คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 800 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงื่อนไขที่ให้ผลทดสอบสมบัติทางกลที่สูงที่สุดมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต่ำที่สุดคือ S1000-F15 กับ S800-F30 เพื่อวิจารณ์ผลของโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติทางกล ผ่านการถ่ายภาพบริเวณกึ่งกลางพื้นที่กวนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ บริเวณของพื้นที่กวนของแนวเชื่อม ดังนี้



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเงื่อนไข S1000-F15



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเงื่อนไข S800-F30

จากรูปที่ 9 และ 10 พบว่า โครงสร้างจุลภาคพื้นที่กวนของแนวเชื่อมที่เงื่อนไขความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินกวน 15 มิลลิเมตรต่อนาที (S1000-F15) มีการกระจายตัวของอนุภาคสารเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สม่ำเสมอบริเวณของพื้นที่กวนของแนวเชื่อม ส่วนโครงสร้างจุลภาคพื้นที่กวนของแนวเชื่อมที่เงื่อนไขความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 800 รอบต่อนาที ความเร็วเดินกวน 30 มิลลิเมตรต่อนาที (S800-F30) มีการกระจายตัวของอนุภาคสารเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณผิวหน้าของพื้นที่กวน เกิดการรวมตัวอยู่ที่เดียว ไม่กระจายตัวทั่วทั้งพื้นที่ของแนวเชื่อม

3.4 วิจารณ์ผลการดำเนินงาน

จากการทดลองเพิ่มความแข็งแรงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยวิธีกวนปิดรูเจาะอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด AA5083 และ AA6061 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าการเลือกใช้พารามิเตอร์มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม โดยที่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมสูงขึ้น และความเร็วเดินเชื่อมต่ำลง จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนบริเวณแนวเชื่อมที่เพียงพอให้เนื้อวัสดุเชื่อมอ่อนตัว ง่ายต่อการกระจายตัวของอนุภาคสารเสริมแรง และมีเวลาและความเร็วเพียงพอจะหมุนเหวี่ยงให้อนุภาคสารเสริมแรงเกิดการกระจายตัวไปทั่วพื้นที่กวน ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคสารเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สม่ำเสมอในบริเวณพื้นที่กวนของแนวเชื่อม ขณะที่เงื่อนไขความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมต่ำ ความเร็วเดินเชื่อมสูง จะทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ เนื่องจากความร้อนบริเวณแนวเชื่อมไม่เพียงพอให้เนื้อวัสดุเชื่อมอ่อนตัว อีกทั้งยังมีเวลาและความเร็วไม่เพียงพอที่จะหมุนเหวี่ยงให้อนุภาคสารเสริมแรงเกิดการกระจายตัวไปทั่วพื้นที่กวน ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของผงอนุภาค ไม่กระจายตัวทั่วพื้นที่ของแนวเชื่อม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gopalakrishnan and Murugan [13] ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุเชิงประกอบ AA6061/TiCp ซึ่งพบว่า การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบเครื่องมือและความเร็วเดินเชื่อมมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม คือเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเครื่องมือจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นด้วย ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราความเร็วเชื่อมจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ในความสัมพันธ์ลักษณะเชิงเส้นตรงแบบผกผัน

ระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานดีที่สุดของการทดลองนี้ คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินกวน 15 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดคือ 211.63 MPa แนวเชื่อมมีความแข็งแรงลดลงเฉลี่ย 20% ของอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061 และเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Jannet, Mathews and Raja [2] ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด AA5083 และ AA6061 แบบไม่เติมอนุภาคผงสารเสริมแรง ที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 200 MPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยนี้ ถือว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยวิธีกวนปิด

รูเจาะอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด AA5083 และ AA6061 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์นี้สามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงได้

4. สรุปผล

4.1 การศึกษาการเพิ่มความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยวิธีกวนปิดรูเจาะอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด AA5083 และ AA6061 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าปัจจัยการทดลองที่ความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินกวน 15 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดคือ 211.63 MPa แนวเชื่อมมีความแข็งแรงลดลงเฉลี่ย 20% ของอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061 ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยวัสดุฐานเกรด AA5083 และ AA6061

4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อม และปัจจัยความเร็วเดินเชื่อมมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยที่ปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม โดยเมื่อเพิ่มปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือกวนผสมแนวเชื่อมสูงขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นตาม ขณะที่เมื่อลดปัจจัยความเร็วเดินกวนลง จะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่สูงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือ เครื่องจักร และวัสดุการทดลองจากสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] B. Venu, I. BhavyaSwathi, L. S. Raju, and G. Santhanam, “A Review on Friction Stir Welding of Various Metals and Its Variables,” *Materials Today,* vol. 18, no. 1, pp. 298–302, 2019. doi:10.1016/j.matpr.2019.06.304

[2] S. Jannet, P. K. Mathews, and R. Raja, “Comparative Investigation of Friction Stir Welding and Fusion Welding Of 6061 T6 – 5083 O Aluminum Alloy Based on Mechanical Properties and Microstructure,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences,* vol. 62, no. 4, pp. 791–795, 2014. doi:10.2478/bpasts-2014-0086

[3] M. Ghaffarpour, S. Kolahgar, B. M. Dariani, and K. Dehghani, “Evaluation of Dissimilar Welds of 5083-H12 and 6061-T6 Produced by Friction Stir Welding,” *Metallurgical and Materials Transactions A,* vol. 44, no. 8, pp. 3697–3707, 2013. doi:10.1007/s11661-013-1739-2

[4] I. Shigematsu, Y. Kwon, K. Suzuki, T. Imai, and N. Saito, “Joining of 5083 and 6061 Aluminum Alloys by Friction Stir Welding,” *Journal of Materials Science Letters,* vol. 22, no. 5, pp. 353–356, 2003. doi:10.1023/A:1022688908885

[5] N. Kumar, G. Gautam, R. K. Gautam, A. Mohan, and S. Mohan, “Synthesis and Characterization of TIB2 Reinforced Aluminium Matrix Composites: A Review,” *Journal of The Institution of Engineers (India):*

Series D, vol. 97, no. 2, pp. 233–253, 2015. doi:10.1007/s40033-015-0091-7

[6] D. Jiang, I. N. Kolupaev, H. Wang, and X. Ge, "Analysis of mechanical properties of 6010-T6 aluminum alloy without tool tilt angle friction stir welding," *Journal of Adhesion Science and Technology,* vol. 37, no. 13, pp. 2010–2024, 2022. doi:10.1080/01694243.2022.2109254

[7] D. G. Mohan, S. Gopi, J. Tomków, and S. Memon, "Assessment of Corrosive Behaviour and Microstructure Characterization of Hybrid Friction Stir Welded Martensitic Stainless Steel," *Advances in Materials Science,* vol. 21, no. 4, pp. 67–78, 2021. doi:10.2478/adms-2021-0025

[8] R. G. Narayanan. "Effect of tool plunge depth on joint formation and mechanical performance of friction stir forming joints made between AA 5052-H32 and AA 6061-T6 sheet metals." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 28, no. 4, pp. 613-628, 2018. doi:10.1016/S1003-6326(18)64694-1

[9] P. Vijayavel, V. Balasubramanian, and S. Sundaram, "Effect of Shoulder Diameter to Pin Diameter (D/d) Ratio on Tensile Strength and Ductility of Friction Stir Processed LM25AA-5% Sicp Metal Matrix Composites," *Materials & Design,* vol. 57, pp. 1–9, 2014. doi:10.1016/j.matdes.2013.12.008

[10] M. Zohoor, M. K. Besharati Givi, and P. Salami, "Effect of Processing Parameters on Fabrication of Al–Mg/Cu Composites via Friction Stir Processing," *Materials & Design,* vol. 39, pp. 358–365, 2012. doi:10.1016/j.matdes.2012.02.042

[11] R. Dhayalan, K. Kalaiselvan, and R. Sathiskumar, "Characterization of AA6063/Sic-GR Surface Composites Produced by FSP Technique," *Procedia Engineering,* vol. 97, pp. 625–631, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.291

[12] V. Saravanan, S. Rajakumar, N. Banerjee, and R. Amuthakkannan. "Effect of shoulder diameter to pin diameter ratio on microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-T6 and AA7075-T6 aluminum alloy joints," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, pp. 3637-3645, 2016. doi:10.1007/s00170-016-8695-0

[13] S. Gopalakrishnan and N. Murugan, "Prediction of Tensile Strength of Friction Stir Welded Aluminium Matrix TICP Particulate Reinforced Composite," *Materials & Design,* vol. 32, no. 1, pp. 462–467, 2011. doi:10.1016/j.matdes.2010.05.055