การเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

Friction Stir Spot Welding of SSM 6061 Aluminium Alloy

ชัยยุทธ มีงาม[1*] ศุภชัย ชัยณรงค์[1] ยงยุทธ ดุลยกุล[2] และ เดช เหมือนขาว[2]
[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000
[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยสงขลา จังหวัดสงขลา 90000
Chaiyoot Meengam[1*] Suppachai Chainarong[1] Yongyuth Dunyakul[2] and Dech Maunkhaw[2]
[1]Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla 90000
[2]Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya Songkhla, Songkhla 90000
Corresponding author Email: Chaiyoot.me@skru.ac.th[*]
(Received: January 15, 2023; Revised: June 12, 2023 Accepted: June 12, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง SSM 6061 ซึ่งมีตัวแปรในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบที่ 380, 760, 1240 และ 2500 รอบ/นาที เวลาในการกดแช่ 30, 45 และ 60 วินาที และระยะกดลึก 2.4 มิลลิเมตร จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบจุดมีความสมบูรณ์ ไม่เกิดการบิดตัวหรือแตกร้าวของชิ้นงาน และชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุดมีแนวโน้มที่ยึดติดได้ดี สมบัติทางด้านแรงดึงเฉือนจากการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงสุด อยู่ที่ 251.5 MPa จากตัวแปรที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 30 วินาที และที่ตัวแปรความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 60 วินาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยต่ำสุดที่ 132.07 MPa ตามลำดับ สำหรับสมบัติทางด้านความแข็งแสดงให้เห็นว่าบริเวณรอยเชื่อมที่ถูกกวนมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งเดิมของวัสดุ เมื่อความแข็งสุดสุดอยู่ที่ 59.95 HV และความแข็งเดิมของวัสดุ 54.38 HV ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคไปในทิศทางที่ดี ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานดีด้วย การวิเคราะห์ข้อมูลของความแข็งแรงดึงเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติที่ระดับค่าความเชื่อมมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 98.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมาจากตัวแปรที่ควบคุมได้ และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอีก 1.58 เปอร์เซ็นต์ มาจากตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบจุด อะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง SSM 6061 โครงสร้างจุลภาค สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

Abstract

The research aims to study friction stir spot welding (FSSW) of semi-solid metal 6061 aluminum alloy. For parameters in experimental such as rotation speed at 380, 760, 1240 and 2500 rpm, holding time 30, 45 and 60 second and depth of plunge 2.4 millimeter. The experiments show that the physical characteristics of the specimen from FSSW are complete; there was no distortion or cracking in of the specimen. Which the specimens after FSSW process are likely to produce a very good weld. The maximum shear strength average

was 251.5 MPa from rotational speed of 1240 rpm and holding time 30 second. On the other hand, from rotational speed of 2500 rpm and holding time 60 second gives minimum shear strength average was 132.07 MPa respectively. The results shown that a have increase hardness in stir zone, when maximum hardness was 59.95 HV and hardness of base materials was 54.38 HV. Characteristics of microstructure in the stir zone are changed in a favorable direction, as a result mechanical properties of the specimen well. The analysis of the data retrieval shears strength by statistical confidence level of 95 percent shows that the coefficient of determination (R^2) was 98.42 percent, which comes from controllable and coefficient of determination was 1.58 percent from uncontrollable in experimental.

Keywords: Friction Stir Spot Welding, SSM 6061 Aluminium Alloy, Microstructure, Coefficient of determination

1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding) เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง เกิดขึ้นที่สถาบันงานเชื่อมของประเทศอังกฤษ (The Welding Institute, TWI) [1] ซึ่งกระบวนการเชื่อมนี้ถูกประยุกต์มาจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) โดยอาศัยการเสียดทานของผิวชิ้นงานกับหัวเชื่อม (Tool Pin) จนทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเกิดความร้อน และใช้แรงกดเพื่อให้ชิ้นงานเกิดความที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองเกิดการอ่อนตัวจนนำไปสู่ยึดติดกันของชิ้นงาน การเชื่อมเสียดทานแบบจุดมีข้อดีหลายข้อด้วยกัน เช่น ไม่จำเป็นต้องเติมลวดเชื่อม การเชื่อมเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ฯลฯ โดยมีตัวแปรในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) เวลาในการกดแช่ (Dwell Time) และแรงกด (Pressure) เป็นต้น อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่มักจะนำกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุดใช้สำหรับการเชื่อมในอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industries) [2] เนื่องจากใช้สำหรับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาไม่มากนัก นอกจากนั้นวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักเบา ได้แก่ แมกนีเซียม อะลูมิเนียม เป็นต้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมที่นำมาใช้งานหลายเกรดด้วยกัน เพื่อความเหมาะสมในการใช้งานในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งอะลูมิเนียม เกรด 6061 ก็เป็นอีกเกรดที่นำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ล้อแมค หรือชิ้นส่วนต่างๆ ที่รับแรงกระทำที่สูง เพราะคุณสมบัติที่เบาและมีความแข็งแรงสูงเมื่อนำไปใช้งาน นอกจากนั้นอะลูมิเนียม เกรด 6061 ยังถูกนำไปใช้งานในชิ้นส่วนหรืออุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมอากาศยาน (Aircraft industries) ตัวรถไฟหรือตู้โดยสาร (Body or Passenger car) เป็นต้น [3] อย่างไรก็ตามการต่อ (Joint) อะลูมิเนียมเข้าด้วยกันมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตที่สูง และสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวแปรที่มีความเหมาะสมในการเชื่อมเพื่อนำไปสู่คุณภาพที่ดีของแนวเชื่อม และนำไปสู่การลดค่าใช้จ่ายในการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

จากข้อมูลและเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ โดยจะศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุด และทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Weld Zone) เช่น ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงดึง เป็นต้น ทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยา และนำผลที่ได้จากการทดลองไปใช้ในงานเชิงวิศวกรรมและประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1. เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

2.2. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค มหภาคของแนวเชื่อมหลังจากกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

2.3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกล คือ การทดสอบแรงดึง การทดสอบความแข็ง จากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1. อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061

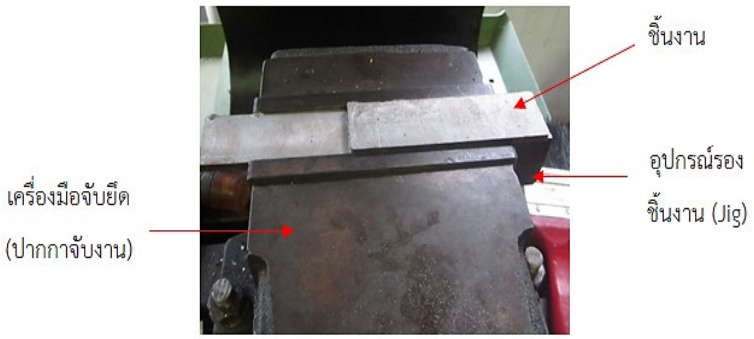
อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6061 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 ผ่านการหล่อขึ้นรูปในสถานะแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas Induce Semi Solid) พบว่าการหล่อด้วยเทคนิค GISS เมื่ออุณหภูมิถึง 658 องศาเซลเซียส จะใช้แก๊สเฉื่อยพ่นผ่านแท่งกราไฟต์พรุน (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) เป็นเวลา 10 วินาที และพักน้ำโลหะเป็นเวลา 30 วินาที ก่อนเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส แล้วอัดด้วยความดันประมาณ 80 MPa ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร ความกว้าง 50 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 [4]

Alloying Element (wt %)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.25	0.15	0.35	Bal.

3.2. การเชื่อมเสียดทานแบบจุด

ลักษณะการจับยึดแผ่นอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 หลังจากการกัดที่ได้ขนาดแล้ว ใช้ปากกาจับงานให้วางอุปกรณ์รองชิ้นงาน (Jig) แล้ววางชิ้นงาน 2 ชิ้น ที่จุดเชื่อมให้ซ้อนชิ้นงาน 28 มิลลิเมตร เพื่อจะเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจับยึดชิ้นงานแบบต่อเกย

การกำหนดตัวแปรและการออกแบบการทดลอง ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 นั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของรอยเชื่อมจะประกอบด้วย รูปแบบของเครื่องมือเชื่อม ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อม แรงกด และชนิดของวัสดุที่นำมาเชื่อม แต่สำหรับงานวิจัย

ครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่ควบคุมได้สองปัจจัย คือ ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อม และเวลาในการกดแช่ที่แตกต่างกัน ซึ่งทั้งสองปัจจัยถูกออกแบบให้เป็นตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งจะสนใจว่าตัวแปรเหล่านั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมมากน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยอื่น ๆ ในการทดลองด้วย โดยกำหนดให้เป็นปัจจัยคงที่ในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ได้แก่ ความหนาของวัสดุขนาด 4 มิลลิเมตร ระยะกดลึกที่ 2.4 มิลลิเมตร แรงกดและรูปทรงของเครื่องมือกวน เป็นต้น สำหรับปัจจัยที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ คณะผู้วิจัยได้กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลอง ทั้งความเร็วรอบในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ระยะเวลาในการกดแช่ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน

การกำหนดขนาดตัวอย่าง สำหรับค่า Estimate และ Minimum Effect (D) สามารถหาค่าได้จากผลของการทดลองที่เกี่ยวข้องหรือค่าที่มีการแนะนำให้ใช้ หรือการทดลองเบื้องต้น ในกรณีงานวิจัยครั้งนี้ไม่มีข้อมูลของการทดลองอื่นหรือมีข้อมูลอื่นๆ มาสนับสนุนในการประมาณค่าที่ต้องการ จึงเลือกวิธีการทดลองการเชื่อมเบื้องต้นก่อน เพื่อหาค่าดังกล่าว โดยทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานและกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเหมือนกับแผนการทดลองแบบสุ่ม และเชื่อมเบื้องต้น 1 ซ้ำ จำนวน 12 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการเชื่อมไปเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน ASTM-E8M [5] และทดสอบชิ้นงานด้วยแรงดึงเฉือน เก็บข้อมูลในส่วนของค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด เพื่อหาค่าความแตกต่างของข้อมูล และใช้สำหรับกำหนดค่า Minimum Effect (D) หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวมาประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เพื่อหาค่า Estimate และขนาดของตัวอย่าง (n) ที่จะใช้กำหนดการทดลองจริงต่อไป

ตารางที่ 2 การออกแบบแผนการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม

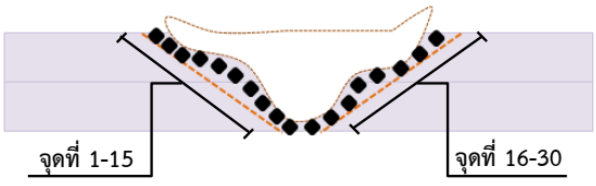
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Rotation Speed	Time	StdOrder
24	1	1	1	2500	60	24
26	2	1	1	380	45	26
30	3	1	1	760	60	30
3	4	1	1	380	60	3
20	5	1	1	1240	45	20
23	6	1	1	2500	45	23
35	7	1	1	2500	45	35
19	8	1	1	1240	30	19
13	9	1	1	380	30	13
11	10	1	1	2500	45	11
25	11	1	1	380	30	25
28	12	1	1	760	30	28
8	13	1	1	1240	45	8
17	14	1	1	760	45	17
18	15	1	1	760	60	18
10	16	1	1	2500	30	10
5	17	1	1	760	45	5
32	18	1	1	1240	45	32
34	19	1	1	2500	30	34

ตารางที่ 2 การออกแบบแผนการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Rotation Speed	Time	StdOrder
14	20	1	1	380	45	14
24	1	1	1	2500	60	24
26	2	1	1	380	45	26
30	3	1	1	760	60	30
3	4	1	1	380	60	3
20	5	1	1	1240	45	20
23	6	1	1	2500	45	23
35	7	1	1	2500	45	35
19	8	1	1	1240	30	19
13	9	1	1	380	30	13
11	10	1	1	2500	45	11
25	11	1	1	380	30	25
28	12	1	1	760	30	28
8	13	1	1	1240	45	8
17	14	1	1	760	45	17
18	15	1	1	760	60	18
10	16	1	1	2500	30	10
5	17	1	1	760	45	5
32	18	1	1	1240	45	32
34	19	1	1	2500	30	34
14	20	1	1	380	45	14

3.3. การทดสอบสมบัติทางกล

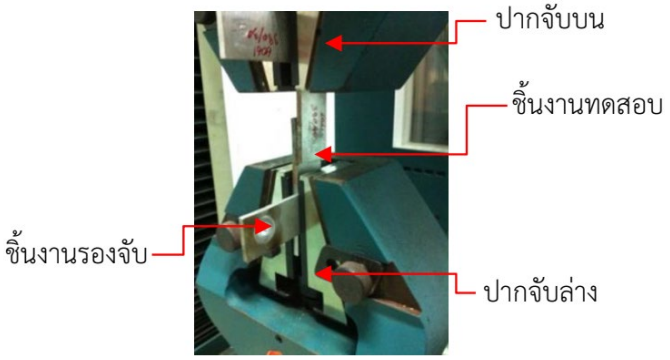
การทดสอบความแข็ง การทดสอบความแข็งจะทดสอบแบบวิกเกอร์ส ด้วยการใช้หัวเพชรรูปทรงพีระมิด มุม 136 องศา ในการกดชิ้นงาน ซึ่งตำแหน่งที่กดความแข็งจะกดรอบ ๆ รอยเชื่อม จำนวน 30 จุด โดยแต่ละจุดมีระยะห่างกัน 0.4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองตำแหน่งกดทดสอบความแข็งของชิ้นงานเชื่อม

การทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 ซึ่งชิ้นงานทั้งสองชิ้นที่เชื่อมต่อกันจะอยู่ในลักษณะต่อเกยกัน ชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนถูกนำไปทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67 มิลลิเมตร/วินาที เป็นการทดสอบชิ้นงานแบบ ซึ่งการทดสอบจะอ้างตามมาตรฐาน

การทดสอบแรงดึงเฉือนมาตรฐาน JIS Z3136 ทดสอบด้วยเครื่องยี่ห้อ NARIN รุ่น NRI-CPT500-50 ดังแสดงในรูปที่ 3 อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานหลังการเชื่อมต้องไปเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงเฉือนให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ผลการทดสอบที่ได้จะมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Strengths)

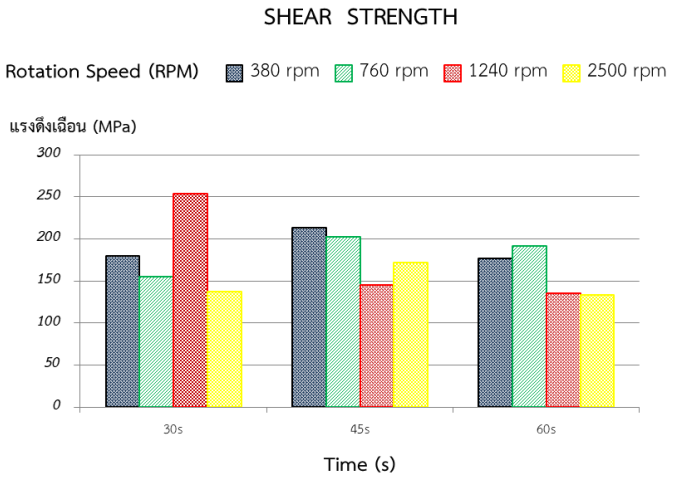


รูปที่ 3 การทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1. ผลทดสอบแรงดึงเฉือน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเชื่อมและเวลาในการกดแช่ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนในแต่ละตัวแปรของการทดลอง ผลการแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานหลังการเชื่อมทุก ๆ การทดลอง มีผลการทดลองที่ดี โดยชิ้นงานยึดติดกัน ในทุกตัวแปรของการทดลอง ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 30 วินาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 251.5 MPa เนื่องจากลักษณะโครงสร้างมีการประสานกันดี ไม่พบจุดบกพร่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ในทางตรงกันข้ามค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 60 วินาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 132.07 MPa ซึ่งมาจากความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่น้อยกว่าที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 30 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกันของทั้งสองการทดลอง อย่างไรก็ตามในตัวแปรการเชื่อมที่เวลาในการกดแช่ 45 วินาที แสดงให้เห็นว่ามีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยใกล้เคียงกันในทุก ๆ ความเร็วหมุนเชื่อม โดยที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ย 221.50 MPa ที่ความเร็วรอบ 760 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ย 197.83 MPa ที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ย 147.67 MPa และที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ย 168.10 MPa ตามลำดับ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของตัวแปรเหล่านี้มีลักษณะที่คล้าย ๆ กัน และความร้อนสะสมที่เกิดในระหว่างการเชื่อมก็ไม่แตกต่างกันด้วย สำหรับเวลาในการกดแช่ 60 วินาที ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยจะอยู่ที่ 178.33, 190.53, 135.83 และ 132.07 MPa จากความเร็วที่ 380, 760, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ตามลำดับ อีกสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ดีนั้นมาจากขนาดความกว้างของรอยเชื่อม [6] โดยรอยเชื่อมที่กว้างสามารถรับแรงดึงได้ดี ในทางกลับกันรอยเชื่อมที่มีขนาดที่เล็กและแคบจะส่งผลต่อการรับแรงดึงที่ไม่ดี อย่างไรก็ตามขนาดของแนวเชื่อมก็มาจากการสร้างองค์ประกอบของความร้อนในการเชื่อม ซึ่งมาจากการทดลองในแต่ละตัวแปรที่แตกต่างกัน สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบจุด การสร้างความร้อนเพื่อให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัวเป็นเรื่องสำคัญ [7] เพราะจะส่งผลต่อการยึดติด และมีผลต่อสมบัติทางด้านแรงดึงของชิ้นงานหลังการเชื่อมอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเฉือน

4.2. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 ตั้งสมมุติฐานการทดลองเพื่อพิจารณาที่ผลกระทบหลัก (Main Effects) และผลกระทบร่วม (Interaction Effects) ที่ 2 ปัจจัย เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติมีผลการทดลองดังแสดงต่อไปนี้

พิจารณา Main Effect

- ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบของเครื่องมือ

$\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ คือ ความเร็วรอบของกรรมวิธีเสียดทานแบบจุด

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3 \neq \tau_4 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน

- ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ คือ ระยะเวลาการกดแช่

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่แตกต่างกัน

พิจารณาที่ 2 Factor Interaction Effect

- ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและเวลาในการกดแช่

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ ทุกระดับ i ,j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา $(i = 1,2,3,4; j = 1,2,3)$

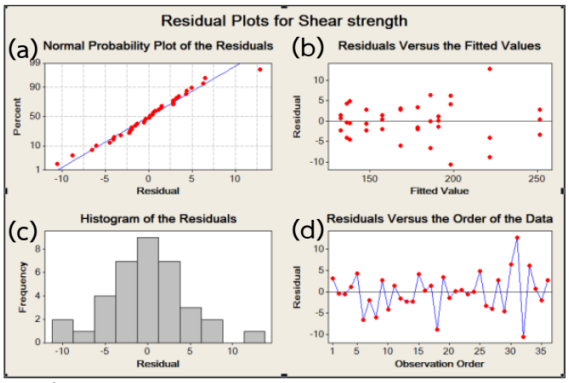
$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา $(i = 1,2,3,4; j = 1,2,3)$

วิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม เป็นเส้นตรง และการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ในลักษณะใด จากรูปที่ 5(a) เพื่อให้มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองอยู่ภายใต้สภาวะการควบคุมโดยพิจารณาดังนี้

1) พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูลโดยดูจากกราฟ Residual Versus the Order of the Data ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิกัดควบคุมหรือไม่ จากลักษณะของจุดที่ควรให้ความสำคัญจากรูปที่ 5(d) ดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม

2) พิจารณากระจายตัวว่าข้อมูลเป็นแบบการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากข้อมูลมีมากถึง 36 ตัว จึงพิจารณาจาก Histogram of the Residuals จากรูปที่ 5(c) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงการกระจายตัวแบบ Normal Distribution จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ

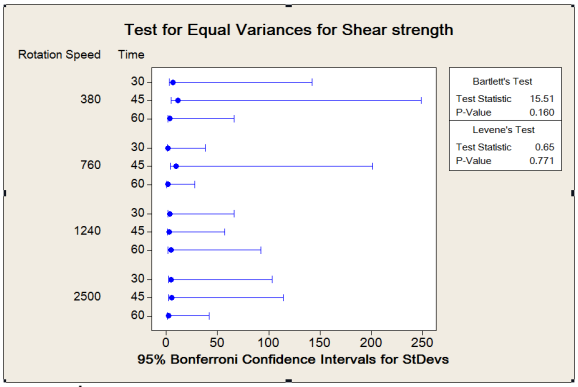
3) พิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์ลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกันมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์จาก (Model Adequacy Checking) ดังแสดงในรูปที่ 5(b) ลักษณะข้อมูล Residuals Versus the Fitted Values ที่ได้มีบางค่าที่กระจายตัวออกห่างจากจุดศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลอง มีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

ทดสอบสมมติฐาน ที่ระดับนัยสำคัญ = 0.05

จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้ดังรูปที่ 6 ยอมรับ เนื่องจากค่า P-Value = 0.771 ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่า = 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 ครั้ง มีค่าเท่ากัน หรือมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 6 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

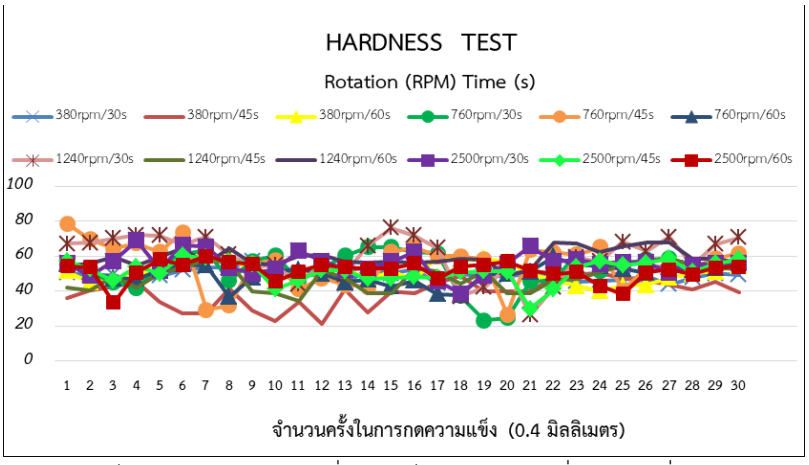
จากการวิเคราะห์ข้อมูลของความแข็งแรงดึงเฉือนตามปัจจัยต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 98.42 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ความผันแปรต่าง ๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือเชื่อม อุปกรณ์หรือปัจจัยต่าง ๆ ที่มีส่วนในการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบจุดและถูกกำหนดให้คงที่ในการทดลอง ในทางตรงกันข้ามส่วนที่เหลือประมาณ 1.58 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) เช่น สภาพอากาศที่ทดลอง อุณหภูมิความร้อนแวดล้อม หรือความชื้นในการเชื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากการทดลอง [8] สำหรับสภาพอากาศที่ทดลอง อุณหภูมิความร้อนแวดล้อม หรือความชื้นในการเชื่อมเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณภูมิในขณะเชื่อมเสียดทานแบบจุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการเชื่อมในสภาวะของแข็ง การเกิดความร้อนในขณะเชื่อมเกิดขึ้นยาก ต้องอาศัยลักษณะการเสียดทานทางกล ดังนั้นการเกิดการสูญเสียความร้อนจากความชื้น สภาพลมพัดในขณะเชื่อมหรือสภาวะฝนตกนั้นขณะเชื่อม ก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงดึงเฉือน อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 ครั้งนี้ อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ตารางที่ 3 ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาในการกดแช่

Analysis of Variance for Shear Strength , using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation speed	3	11759.5	11759.5	3919.8	132.38	0.000
Holding time	2	4702.5	4702.5	2351.3	79.41	0.000
Rotation speed*Holding time	6	27860.8	27860.8	4643.5	156.82	0.000
Error	24	710.6	710.6	29.6		
Total	35	45033.5				
S = 5.44151	R - Sq = 98.42%		R - Sq (adj) = 97.70%			

4.3. ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งรวมในทุกตัวแปรของการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบ 380, 760, 1240 และ 2500 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 30, 45 และ 60 วินาที ตามลำดับ การทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งมากกว่าเนื้อโลหะเดิมเพียงเล็กน้อย ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและเวลาในการกดแช่ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน เมื่อเพิ่มเวลาในการกดแช่มีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันการเพิ่มความเร็วรอบที่สูงขึ้นก็มีแนวโน้มที่ทำให้ความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที กลับมีค่าความแข็งเพิ่มเพียงเล็กน้อย เนื่องการเกิดการสูญเสียความร้อนในการหมุน (Heat Loss) เพราะฉะนั้นค่าความแข็งหลังจากการเชื่อมมีผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเชื่อม [9] ในทางตรงกันข้ามตัวแปรที่เชื่อมเสียดทานแบบจุดแล้วทำให้ความร้อนในระหว่างการเชื่อมน้อย มีแนวโน้มที่ทำให้ความแข็งน้อยด้วย เพราะโครงสร้างจุลภาคจะเกิดการเปลี่ยนแปลงก็ต่อเมื่อมีพลังงานกระตุ้นมาทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่ จนเกิดการเรียงตัวใหม่ที่เป็นโครงสร้างแบบใหม่ที่เปลี่ยนไปหลังการเชื่อม [10] อย่างไรก็ตามความแข็งที่สูงมากก็ไม่ส่งผลดีมากนัก เพราะมีความเสี่ยงที่จะทำให้ชิ้นงานเปราะ และอาจนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าวหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุดได้ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

4.4. ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที เวลาในการกดแช่ 30 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า ผลการทดลองให้เห็นว่าความเร็วในการเชื่อมและเวลาในการกดแช่ต้องมีการสัมพันธ์ที่เหมาะสม จึงจะทำให้รอยเชื่อมเกิดการยึดติดที่สมบูรณ์กันดี ลดการเกิดจุดบกพร่องในการเชื่อม จากรูปที่ 8 (ตำแหน่งที่ 1 และ 3) แสดงให้เห็นว่าตะเข็บรอยต่อของชิ้นงานเชื่อมประสานกันดี โดยส่งผลมาจากตัวแปรในการทดลอง จะเห็นได้ว่าด้าน Advancing side ของชิ้นงาน และด้าน Retreating side มีการกำจัดตะเข็บรอยต่อที่ดี เนื่องจากความร้อนในขณะเชื่อมเพิ่มตามระยะเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหรือการเพิ่มความเร็วหมุนในการเชื่อม ซึ่งการเพิ่มทั้งสองตัวแปรนี้ส่งผลให้เกิดความร้อนเข้า (Heat input) ในขณะเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่สูงขึ้นด้วย สามารถช่วยให้เนื้อวัสดุของชิ้นงานเชื่อมไหลตัวได้ดี นำไปสู่การยึดติดที่ดีขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามบริเวณรอยเชื่อมพบว่ามีการเชื่อมที่สมบูรณ์ ไม่พบช่องว่างหรือจุดบกพร่อง สาเหตุจากบริเวณรอยเชื่อมสามารถเกิดความร้อนที่ดีในระหว่างการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 8 (ตำแหน่งที่ 2) สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบจุดตัวแปรความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที เวลาในการกดแช่ 30 วินาที สังเกตได้ว่าขนาดโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดที่เล็กกว่าตัวแปรอื่น ๆ เนื่องจากแรงที่กระทำจากการหมุน ซึ่งลักษณะแรงที่กระทำจะเป็นแรงเฉือน (Shear Force) [11]

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที เวลาเชื่อม 30 วินาที

ในทางตรงกันข้าม โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เวลาในการกดแช่ 60 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าชิ้นงานหลังการเชื่อมมีตะเข็บช่องว่างจากการเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของความร้อนของด้าน Advancing side และด้าน Retreating side ดังแสดงในรูปที่ 9 (ตำแหน่งที่ 1 และ 3) เนื่องจากเวลาที่นานเกินไปหรือความเร็วรอบที่สูงเกินไปอาจเสี่ยงที่จะทำให้ชิ้นงานไม่ยึดติด เพราะจะเกิดการสูญเสียความร้อนของชิ้นงานในขณะการเชื่อมเสียดทานแบบ

จุด ในขณะที่บริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานก็ประสานกันได้ดี ไม่พบจุดบกพร่องหลังการเชื่อม [12] ดังแสดงในรูปที่ 9 (ตำแหน่งที่ 2) ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่ปราศจากจุดบกพร่องหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุดมาจากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและเวลากดแช่ที่เหมาะสม โดยปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคทั้งทางด้านรูปร่างของโลหะผสมหรือขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป ในทางตรงกันข้ามความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและเวลากดแช่สูงมาก อาจส่งผลต่อการเสียรูปของชิ้นงานและความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อม เนื่องจากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและเวลากดแช่เป็นกลไกที่ก่อตัวของความร้อนในขณะเชื่อมเสียดทานแบบจุด ดังนั้นเมื่อความร้อนในขณะเชื่อมสูงเกินไป นำไปสู่การผลักเนื้อโลหะที่อ่อนตัวออกจากบริเวณรอยเชื่อม ส่งผลให้เกิดเป็นข้อบกพร่องจากการเชื่อม หรือความร้อนที่สูงเกินไปอาจนำไปสู่การบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังการเชื่อม ในขณะที่ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและเวลากดแช่ต่ำ ส่งผลให้ชิ้นงานได้รับความร้อนน้อย นำไปสู่การไม่ยึดติดของชิ้นงาน โครงสร้างภายในบริดวณรอยเชื่อมเกิดจุดพกพร่อง สุดท้ายนำไปสู่การยึดติดของชิ้นงานที่ไม่แข็งแรงเพียงพอ

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เวลาเชื่อม 60 วินาที

5. สรุปผล

การเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6061 พบว่ารอยเชื่อมประสานกันดีในทุกตัวแปรของการทดลอง ชิ้นงานไม่เกิดการแตกร้าวและไม่เกิดการบิดตัวของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค โดยความร้อนและแรงกดทำให้เฟส Mg_2Si การแตกหักเล็กลงกระจายทั่วรอยเชื่อมจนเป็นโครงสร้างที่ละเอียด เรียกว่า “Fine Structure” และโครงสร้างบางส่วนที่เกิดผสมผสานกัน เรียกว่า “Mix Zone” ซึ่งจะมีลักษณะเกรนแบบหยาบ สำหรับด้าน Advancing side และด้าน Retreating side แรงทำให้เกรนก้อนกลมเกิดการยืดตัวตามแนวแรงหรือทิศทางของการหมุน เรียกว่า “Flow Zone” บริเวณเหล่านี้จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปจากเกรนก้อนกลมไปสู่การยืดของเกรน อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและเวลากดแช่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โดยปัจจัยทั้งสองต้องมีความเหมาะสม จึงจะสามารถกำจัดจุดบกพร่องหลังการเชื่อมได้สมบูรณ์ ผลการทดลองสมบัติทางด้านแรงดึงเฉือนหลังการเชื่อมแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงที่สุด อยู่ที่ 251.5 MPa จากตัวแปรที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 30 วินาที และที่ตัวแปรความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที และเวลาในการกดแช่ 60 วินาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 132.07 MPa ตามลำดับ สมบัติทางด้านความแข็งหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุดแสดงให้เห็นว่าบริเวณรอยเชื่อมที่ถูกกวนมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งเดิมของวัสดุ เมื่อความแข็งสุดสุดอยู่ที่ 59.95 HV และความแข็งเดิมของวัสดุ 54.38 HV สำหรับบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนมีค่าความแข็งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น ๆ การวิเคราะห์ข้อมูลของความแข็งแรงดึงเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติที่ระดับค่าความเชื่อมมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 98.42 เปอร์เซ็นต์ มาจากตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือเชื่อมและอื่น ๆ ที่ควบคุมได้ ส่วนปัจจัยต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ สภาพอากาศที่ทดลอง อุณหภูมิความร้อนแวดล้อมและความชื้นในการเชื่อมมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ อยู่ที่ 1.58 เปอร์เซ็นต์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] C.-S. Jeon, S.-T. Hong, Y.-J. Kwon, H.-H. Cho, and H. N. Han, "Material Properties of Friction Stir Spot Welded Joints of Dissimilar Aluminum Alloys," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* vol. 22, pp. 605–613, 2012.

[2] S. Venukumar, S. Yalagi, and S. Muthukumaran, "Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Conventional and Refilled Friction Stir Spot Welds in AA 6061-T6 Using Filler Plate," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* vol. 23, no. 10, pp. 2833–2842, 2013.

[3] S. Toshiya, M. Kenzo, Y. Shyuhei and I. Kenji, "Friction Stir Spot Welding of Pure Aluminium Sheet in View of High Temperature Deformation," *Transactions of JWR*. vol. 40, no. 2, pp. 1–5, 2011.

[4] R. Burapa, S. Janudom, T. Chucheep, R. Canyook, and J. Wannasin, "Effects of Primary Phase Morphology on Mechanical Properties of Al-Si-Mg-Fe Alloy in Semi-Solid Slurry Casting Process," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. vol. 20, no. 3, pp. s857–s861, 2010.

[5] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8/E8M-09, 2019.

[6] Y. C. Chen, A. Gholinia and P. B. Prangnell, "The Effect of a Paint Bake Treatment on Joint Performance in Friction Stir Spot Welding AA6111-T4 Sheet Using a Pinless Tool," *Materials Chemistry and Physics*. vol. 141, pp. 768–775, 2013.

[7] Y.F. Sun, H. Fujii, N. Takaki and Y. Okitsu, "Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Al Alloy/Steel Joints Prepared by A Flat Spot Friction Stir Welding Technique," *Materials and Design*. vol. 47, pp. 350–357, 2013.

[8] J. M. Piccinia and H. G. Svoboda, "Effect of Pin Length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Dissimilar Aluminum-Steel Joints," *Procedia Materials Science*. vol. 9, pp. 504-513, 2015.

[9] H. Liu, Y. Zhao, X. Su, L. Yu, and J. Hou, "Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded 2A12-T4 Aluminum Alloy," *Advances in Materials Science and Engineering*, pp. 1–10, 2013.

[10] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports,* vol. 50, no. 1-2, pp. 1–78, 2005.

[11] X. W. Yang, T. Fu, and W. Y. Li, "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro- and Microstructure, Property, and Process Modelling," *Advances in Materials Science and Engineering,* vol. 2014, pp. 1–11, 2014.

[12] J.Y. Cao, M. Wang, L. Kong, L.J. Guo, "Hook Formation and Mechanical Properties of Friction Spot Welding in Alloy 6061-T6," *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 230, pp. 254-262, 2016.