

## การออกแบบการทดลองของการเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6

### โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

General Full Factorial Design of AA 6082-T6 Aluminum Alloy

by Friction Stir Welding

ผจญจิต พิจิตบรรจง<sup>1</sup> ชัยยุทธ มีงาม<sup>2</sup> ศุภชัย ชัยณรงค์<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

<sup>1</sup>Phajongjit@gmail.com, <sup>2</sup>Chaiyoot.me@skru.ac.th, <sup>3</sup>Suppachai.ch@skru.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ทำการเตรียมชิ้นงานขนาด 90x150x4 มิลลิเมตร ตัวแปรในการเชื่อมได้แก่ 660, 1110 และ 2220 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 90, 120 และ 150 มิลลิเมตรต่อนาที และเวลาในการกดแช่ 15 วินาที ตามลำดับ นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรงดึงและวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง ผลการทดลองพบว่าตัวแปรในการเชื่อม 2220 รอบต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 183.42 MPa ในทางตรงกันข้ามตัวแปรในการเชื่อม 1100 รอบต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเฉลี่ย 128.21 MPa และจากการออกแบบการทดลองแบบหลายระดับพบว่ามีความเชื่อมันที่ระดับนัยสำคัญ 95.32 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ความแข็งแรงดึง

#### ABSTRACT

The objective of this research is to clarify the effect to rotation speed and travelling speed affect tensile strength of AA6082-T6 aluminum alloy welded by friction stir welding. The specimen with 90x150x4 mm were prepared. The parameters for this welding are rotation speeds at 660, 1110 and 2220 rpm, travelling speed at 90, 120 and 150 mm/min and holding friction time at 15 seconds, respectively. The welded specimens were weaseled to tensile strength. The relationship between the welding parameters and tensile strength was analyzed. From the results, it was found that the rotation speed at 2220 rpm and the travelling speed at 150 mm/min provided the maximum average tensile strength of 183.42 MPa. On the other hand, the rotation

speed at 1100 rpm and travelling speed at 150 mm/min resulted in the minimum average tensile strength at 128.21 MPa. From multilevel factorial design model, the significant confidence interval value was obtained at 95.32.

**Keywords:** Friction stir welding, Aluminum Alloy grade AA6082-T6, Tensile Strength

## 1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ถูกคิดค้นที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The Welding Institute) (W.B. Lee., 2003) เป็นการเชื่อมโลหะให้ยึดติดกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น อาศัยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยที่ป้าสัมผัสแผ่นงานและหมุนด้วยความเร็วหมุนเชื่อมตามที่กำหนด พร้อมกับความเร็วในการเดินเชื่อม และแรงกดในขณะที่เชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเชื่อม คือ แรงกด (Down Force) ความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน (Rotation Speeds) ความเร็วในการเดินเชื่อม (Travel Speed) มุมเอียง (Tilt Angle) และรูปร่างของเครื่องมือกวน (Shape of Tool) เป็นต้น (H. Lambard., 2007) อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมักถูกนำมาเชื่อมวัสดุกลุ่มโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Metal) อะลูมิเนียม ถูกนำมาเชื่อมด้วยวิธีการเสียดทานแบบกวนอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ก็เป็นอีกเกรดหนึ่งที่มีการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สำหรับอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 มักถูกใช้งานในอุตสาหกรรมเรือ อุตสาหกรรมอากาศยานและอุตสาหกรรมรถไฟ เพราะมีความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา (E.P. Koumoulos, C., 2011) ดังนั้นอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 จึงมีราคาค่อนข้างสูง ในขณะที่เดียวกันการเชื่อมด้วยวิธีการเสียดทานแบบกวนจำเป็นต้องมีการหาตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อม เนื่องจากสามารถลดการใช้วัสดุที่สิ้นเปลืองได้ อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ยังเป็นงานที่ใหม่ในการเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ยังถูกใช้การเชื่อมแบบแมก (Metal Inert Gas Arc Welding Process) ที่เป็นกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย ซึ่งส่งผลต่อการเกิดจุดบกพร่องหลังการเชื่อม

จากข้อมูลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาปัจจัยของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 จากการใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยชิ้นงานที่ได้หลังการเชื่อมได้นำไปทดสอบความแข็งแรงดึงและประเมินความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการทดลองกับความแข็งแรงดึงด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติวิศวกรรม

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรจากการเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 โดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนและหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของการเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ทำการเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ขนาด 90x150 มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว) ที่ความหนาเชื่อม 4 มิลลิเมตร และนำไปกัด (Milling) ขอบชิ้นงานให้เรียบด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง

#### 3.2 การกำหนดตัวแปรและการออกแบบการทดลอง

ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีสองตัวแปรหลักที่สามารถควบคุมได้ แต่ละตัวแปรมีระดับการทดลองอยู่ที่ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

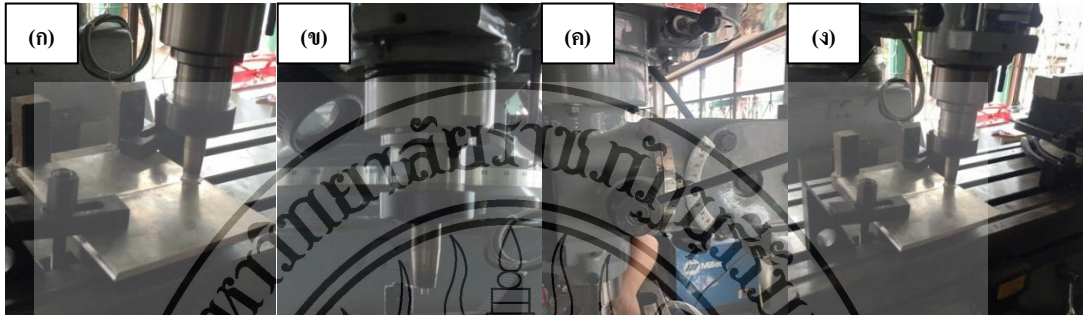
ตัวแปร	ระดับการทดลอง		
	1	2	3
ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที)	660	1,100	2,200
ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)	90	120	150
เวลาในการกัดแซ่ (วินาที)	15		
มุมเอียงของหัวกวน (องศา)	3		

การออกแบบการทดลองเป็นแบบ General Full Factorial เป็นการออกแบบของปัจจัยที่แต่ละปัจจัยมีระดับการทดลองไม่เท่ากัน โดยการใช้โปรแกรม MINITAB V.16 มาใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติและหาผลการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) ผ่านทางค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ตลอดจนระดับการทดลองของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม หลังจากการออกแบบการทดลองตามปัจจัยที่กำหนดแล้ว พบว่าเงื่อนไขในการทดลองจริงมีทั้งหมด 27 เงื่อนไข โดยการทดลองแต่ละเงื่อนไขนั้นได้ทำการทดลองเงื่อนไขละ 3 ครั้ง

#### 3.3 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6

จับยึดอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 ทั้งสองแผ่นลงบนอุปกรณ์จับยึด (Jig) ให้แน่น โดยต่อชิ้นงาน ให้ขอบชิ้นงานสัมผัสกันสนิทพอดี ดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) จากนั้นนำหัวกวนมาประกบกับตัวเครื่องเชื่อม (ประยุกต์จากเครื่องกัดแนวตั้ง) ดังแสดงในภาพที่ 1 (ข) ปรับมุมเอียงหัวกวนให้ทำมุม 3 องศา แนวขนาดทิศทางเดินกวน ดังแสดงในภาพที่ 1 (ค) หลังจากนั้นเปิดสวิตซ์ให้หัวกวนหมุนแล้วนำมากดบนกึ่งกลางรอยต่อของชิ้นงาน บริเวณผิวชิ้นงานจะเกิดความร้อนจากการเสียดสีกันระหว่างผิวชิ้นงานกับบ่าของหัวกวน ในขณะที่ผิวทั้งสองสัมผัสกันให้ใช้เวลาในการกัดแซ่ 15 วินาที จากนั้นเดินเชื่อมด้วยความเร็วที่กำหนดไว้ การหมุนกวนของหัวกวนจะลากเนื้อวัสดุที่เกิดการอ่อนตัวให้ประสานกัน ซึ่งจะเดินจนสุดชิ้นงานแล้วหยุดเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 1 (ง) เมื่อสิ้นสุดแนวเดินเชื่อม

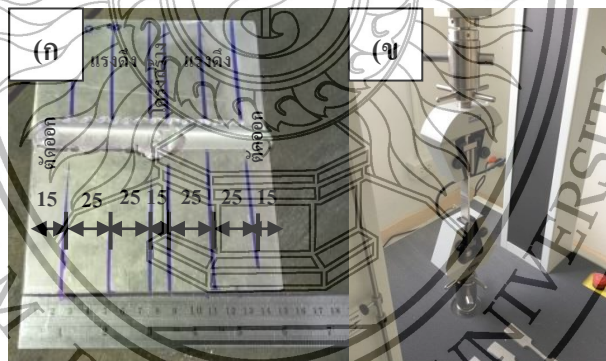
ให้ยกหัวทวนขึ้นจากชิ้นงาน เป็นการเสร็จกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบทวนของอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบทวนของอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6

### 3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานหลังการเชื่อมถูกนำไปตัดแบ่งด้วยเลื่อยสายพาน เพื่อนำชิ้นงานบางส่วนไปทดสอบแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งตามมาตรฐาน ASTM E8 และใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ LLOYD ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข)



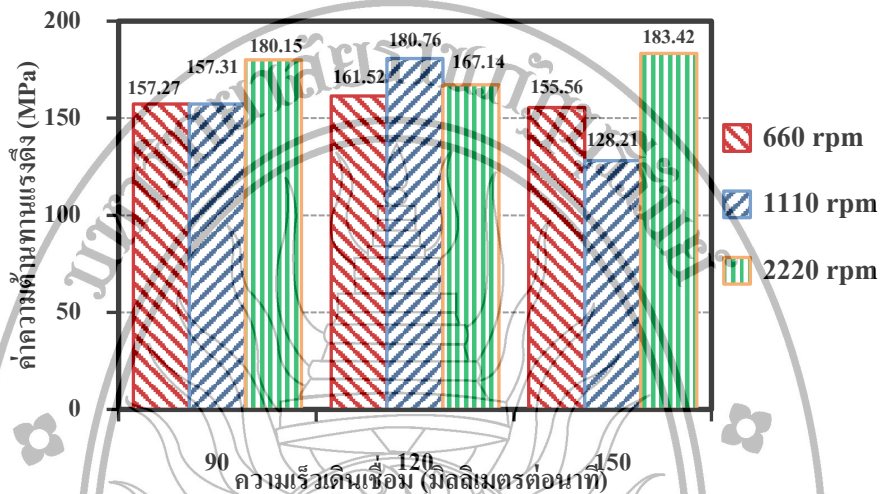
ภาพที่ 2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ภาพที่ 3 แสดงผลของความสัมพันธ์ของตัวแปรความเร็วหมุนเชื่อม ตัวแปรความเร็วเดินเชื่อมและความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ พบว่าชิ้นงานหลังการเชื่อมสามารถเชื่อมต่อกันได้ดี ตัวแปรความเร็วหมุนเชื่อม 2200 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 183.42 MPa ในทางตรงกันข้ามตัวแปรความเร็วหมุนเชื่อม 1110 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 128.21 MPa ดังนั้นความแข็งแรงดึงสูงสุดสาเหตุมาจากความเร็วรอบหมุนเชื่อมที่ 2200 รอบต่อนาที เป็น

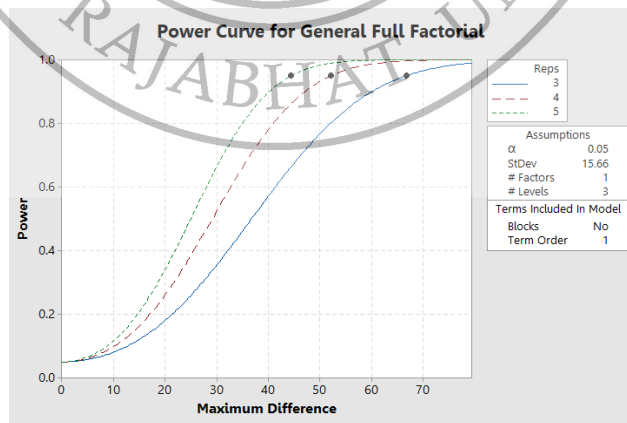
ความเร็วรอบที่สูงสุดในการทดลอง ซึ่งส่งผลต่อการเกิดความร้อนที่สูงในระหว่างการเชื่อม ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัวได้ง่าย (เกิดสภาวะ Plastic Deformation สูง) ทำให้เนื้อวัสดุไหลวนระสานกันได้ดี ซึ่งทำให้ลดจุดบกพร่องแบบช่องว่าง (Void) ส่งผลให้ที่ตัวแปรความเร็วรอบหมุนเชื่อมที่ 2200 รอบต่อนาที มีความความแข็งแรงดึงที่สูงกว่าตัวแปรอื่นในการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียม เกรด AA 6082-T6 หลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบทวน

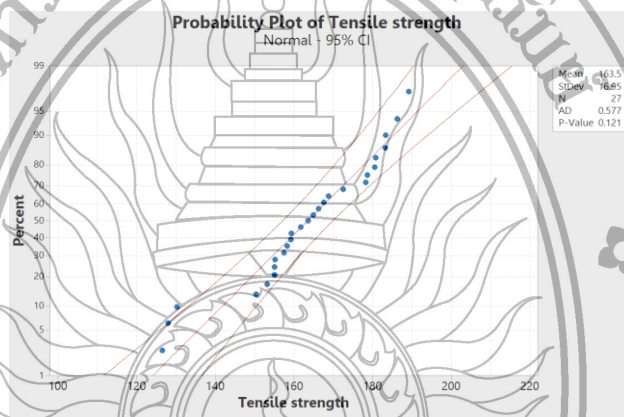
#### 4.2 การประเมินผลการทดลองทางสถิติวิศวกรรม

จากการทดลองเพื่อยืนยันความเหมาะสมของจำนวนข้อมูลในการทดลอง จึงได้ประเมินสถิติทางวิศวกรรม แสดงดังภาพที่ 4 โดยพบว่าจำนวนการทดลองซ้ำทั้ง 3, 4 และ 5 ซ้ำนั้น อยู่ในบริเวณความเชื่อมั่นที่ 95% ทั้งหมด ดังนั้นจึงทำการเลือกทดลองที่ 3 ซ้ำ เพราะช่วงของ Maximum Difference ของการทดลองอยู่ในช่วง 60-70 ดังนั้นผลการทดลองของผู้วิจัยที่ทำมาทั้งหมด 3 ซ้ำ จึงเหมาะสมและเพียงพอ



ภาพที่ 4 ขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสมของการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ General Full Factorial โดยมีความเร็วหมุนเชื่อม และเวลาเป็นตัวแปรที่ทำการทดสอบ ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูล ได้แก่ ความเป็นปกติ (Normality) ความเป็นอิสระ (Independence) และความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance) (Montgomery. D.C., 2000) โดยพบว่าการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability) เพื่อพิจารณาค่า p-value เปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่ 0.05 ดังแสดงในภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์จากกราฟการกระจายตัวแบบปกติของค่าความแข็งแรงดึงได้ค่า p-value เท่ากับ 0.121 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงทำให้ยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ )



ภาพที่ 5 ลักษณะการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล การทดสอบค่าความแปรปรวนของส่วนตักข้าง แสดงดังภาพที่ 6 ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานหลักและสมมติฐานรอง เมื่อพิจารณาค่า p-value เปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่ระดับ 0.05 มีค่ามากกว่า จึงแสดงได้ว่ายอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่าผลของความแปรปรวนเท่ากันหรือทุกระดับของการทดลองมีค่าคงที่ ส่วนความเป็นอิสระของข้อมูลดังภาพที่ 7 พบว่าไม่ปรากฏหลักฐานว่าค่าของส่วนตักข้างมีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน จากการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 ประเภทพร้อมนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ที่เกิดจากตัวแปรทั้งสองต่อไป

Null hypothesis All variances are equal  
 Alternative hypothesis At least one variance is different  
 Significance level  $\alpha = 0.05$

95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

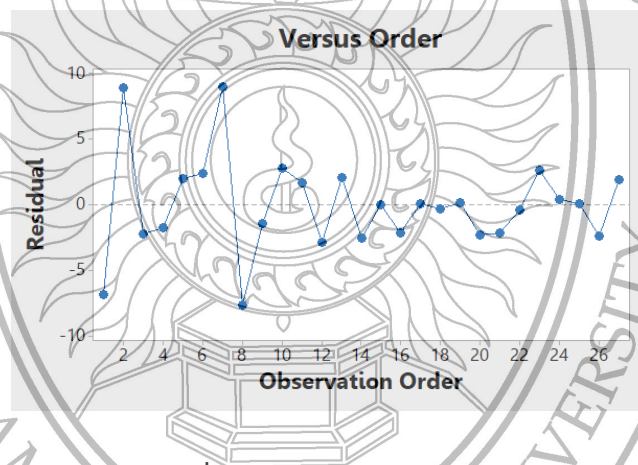
Rotation speed	Travel speed	N	StDev	CI
660	90	3	8.12553	(0.0000038, 228823690)
660	120	3	2.22879	(0.0000010, 62765102)
660	150	3	2.56036	(0.0000012, 72102447)
1110	90	3	2.14007	(0.0000010, 60266684)
1110	120	3	2.48151	(0.0000012, 69882047)
1110	150	3	1.85058	(0.0000009, 52114232)
2220	90	3	8.44544	(0.0000040, 237832670)
2220	120	3	1.95425	(0.0000009, 55033840)
2220	150	3	2.86001	(0.0000013, 80540852)

Individual confidence level = 99.4444%

Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	-	0.580
Levene	1.12	0.396

ภาพที่ 6 ความเท่ากันของความแปรปรวน



ภาพที่ 7 ความเป็นอิสระของข้อมูล

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งรวมถึงปัจจัยร่วมของความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมด้วย โดยมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ทั้ง 3 ค่า ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-sq เท่ากับ 95.32% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความผันแปรต่างๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ ส่วนที่เหลือประมาณ 4.68% เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ สภาพอากาศ ความชื้นในอากาศ เป็นต้น

## ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Rotation speed	2	2464.2	1232.08	63.35	0.000
Travel speed	2	919.5	459.76	23.64	0.000
Rotation speed* Travel speed	4	3740.5	935.13	48.08	0.000
Error	18	350.1	19.45		
Total	26	7474.3			

R-sq 95.32 R-sq(adj) = 93.23%

### 5. การอภิปรายผล

ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมที่แตกต่างกันมาจากความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ซึ่งทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อการเกิดความร้อนในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพราะการเชื่อมวิธีนี้อาศัยความร้อนจากการเสียดทานระหว่างผิวงานกับผิวของเครื่องมือกวน ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าจุดหลอมละลายของชิ้นงานเชื่อม (เจนณรงค์ นาคเทชวิญ, 2554) อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2200 รอบต่อนาที มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ดี ดังนั้นที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงจะส่งผลให้เกิดความร้อนที่ดีในขณะเชื่อม (Leala R.M., 2008) เพราะความร้อนในการเชื่อมที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่อง (Defect) (Y.G. Kim., 2006) โดยเมื่อความร้อนเชื่อมสูงทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวได้ง่าย การกวนเสียดทานสามารถทำให้เนื้อวัสดุที่เกิดการหมุนรอบหัวกวนไหลวน ประสานกันได้ดี นำไปสู่การลดช่องว่าง นอกจากนั้นความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกันมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเนื้อวัสดุด้วย (Trimble. D., 2015) เนื่องจากความร้อนส่งผลให้โครงสร้างเกิดการตกตะกอนผลึก (Precipitation) ของโครงสร้างจนเกิดเป็นสารประกอบ (Intermetallic Compound) ใหม่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการเชื่อมได้ (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, 2551) ในทางตรงกันข้ามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วหมุนเชื่อม 660 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำ มีแนวโน้มให้ค่าของความแข็งแรงดึงที่ต่ำ เพราะความร้อนในการเชื่อมที่ต่ำส่งผลต่อการเกิดจุดบกพร่องแบบไม่หลอมละลาย จนนำไปสู่การเกิดช่องว่างขนาดก้นแบนเชื่อม นอกจากนั้นอีกสาเหตุที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงต่ำมาจากตกตะกอนผลึกแบบไม่สมบูรณ์ จากเกิดเกิดความร้อนที่ต่ำ ส่งผลให้โครงสร้างหลังจากการเชื่อมไม่มีความแข็งแรง จนเป็นสาเหตุให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงน้อย ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด AA 6082-T6 จึงควรควบคุมปัจจัยทางด้านความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม เพื่อนำไปสู่สมบัติของความแข็งแรงดึงที่ดี

### 6. สรุปผลการวิจัย

ผลวิจัยการเชื่อมต่อชนของอะลูมิเนียมเกรด AA 6082-T6 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงให้เห็นว่าตัวแปรในการเชื่อมทั้งจากความเร็วเดินกวน ความเร็วเชื่อม มีอิทธิพลต่อการ



เปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงดึง พบว่าตัวแปรความเร็วหมุนเชื่อม 2200 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 183.45 MPa ในทางตรงกันข้ามตัวแปรความเร็วหมุนเชื่อม 1110 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 128.21 MPa และเมื่อประเมินด้วยหลักทางสถิติวิศวกรรมด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบหลายระดับพบว่ามีความเชื่อมั่นที่ระดับนัยสำคัญ 95.32 เปอร์เซ็นต์

## 7. ข้อเสนอแนะ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด AA 6082-T6 เป็นงานวิจัยที่มีความน่าสนใจ แต่ควรมีการศึกษาวิจัยวิธีการเชื่อมทานแบบกวนสำหรับวัสดุกลุ่มอื่นๆ เช่น แมกนีเซียม (Magnesium Alloy) อินโคเนล (Inconel) ไททาเนียม (Titanium Alloy) หรือวัสดุผสม (Composite Materials) เพิ่มเติม รวมถึงการศึกษาการเชื่อมทานแบบกวนต่างวัสดุ (Dissimilar Materials) ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2551). *การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนและการแก้ปัญหาการต่อวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมหลอมละลาย*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- เจนณรงค์ นาคเทวัญ และประภาศ เมืองจันทร์บุรี. (2554). *อิทธิพลของความเร็วรอบและความเร็วที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 7075-T6*. วารสารการเชื่อมไทย. 54, 23-30.
- Box, E.P., George Norman, R., Draper, R. (1987). *Empirical Model-Building and Response Surface*, John Wiley & Sons Inc.
- E.P.Koumoulos, C.A.Charitidis, N.M.Daniolos, D.I.Pantelis. (2011). *Nanomechanical properties of friction stir welded AA6082-T6 aluminum alloy*. Materials Science and Engineering: B. pp.1585-1589.
- H. Lambard, DG. Hattingh, A. Steuer and MN. James. (2007). *Optimizing FSW process parameters to minimize defects and maximize fatigue life in 5083-h321 aluminium alloy*. Engineering Fracture Mechanics. pp.1-14.
- Leala R.M, Leit C, Loureiro A, Rodrigues D.M, Vilac P. (2008). *Material flow in heterogeneous friction stir welding of thin aluminium sheets: Effect of shoulder geometry*. Materials Science and Engineering A. 498, 384-391.
- Montgomery, D.C. (2000). *Designing and analysis of experiments*, John Wiley & Sons Inc.
- Trimble D, O'Donnell G.E, Monaghan J. (2015). *Characterization of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3*. Journal of Manufacturing Processes. pp.141-150.

- W.B. Lee, Y.M. Yeon and S.B. Jung. (2003). **The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy.** Material Science and Engineering A. pp.154-159.
- Y.G. Kim, H. Fujii, T. Komzaki, K. Nakata. (2005). **Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy.** Material Science and Engineering A. pp.250-254.

