# การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม A6063-T831

**ธวัชชัย อินเที่ยง[1] ปัญญา บัวฮมบุรา[2] และ รัตน บริสุทธิกุล[3*]**
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A6063-T831 ที่มีต่อลักษณะของรอยเชื่อมและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม โดยศึกษาผลของตัวแปรการเชื่อมได้แก่ อัตราการหมุนหัวเชื่อมในช่วง 450 ถึง 1120 รอบต่อนาที และความเร็วในการเคลื่อนที่หัวเชื่อมในช่วง 28 ถึง 112 มิลลิเมตรต่อนาที จากการศึกษาพบว่าขนาดบ่อกวนบริเวณผิวชิ้นงานด้านบนที่สัมผัสกับหัวเชื่อมและบริเวณผิวด้านล่างที่สัมผัสกับแผ่นรองไม่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานที่ลงสู่รอยเชื่อมอย่างไรก็ตาม ที่บริเวณใต้บ่าหัวกวนลงมาประมาณ 1.6 มิลลิเมตรของความหนาชิ้นงานขนาดของบ่อกวนจะกว้างขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเกรนในชิ้นงานเชื่อมขึ้นกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพียงเล็กน้อย โดยขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพิ่มขึ้น ในแง่ของสมบัติเชิงกลชิ้นงานที่ได้รับความร้อนขณะทำการเชื่อมสูญเสียความแข็งแรงจากการสลายตัวของตะกอนสารประกอบเชิงโลหะและจากการศึกษานี้พบว่ากลไกหลักที่ส่งผลต่อความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อม ได้แก่ กลไกการเพิ่มขอบเกรน และกลไกการเพิ่มความเครียด

**คำสำคัญ :** เชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวน / พลังงาน / ขนาดเกรน / ขนาดบ่อกวน / สมบัติเชิงกล

* *Corresponding Author : rattana@sut.ac.th*

[1] *นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[2] *อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[3] *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

# The Study of A6063-T831 Friction Stir Welding

**Tawatchai Intaing[1], Panya Buahombura[2] and Rattana Borrisutthekul[3*]**

Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

## Abstract

The effect of energy input per length during friction stir welding (FSWed) of A6063-T831 aluminum alloy on the size of stir zone, grain size and mechanical properties of the welded joints were investigated in this study. In order to investigate the effect of energy input per length, the rotating speed and the travelling speed were varied between 450 to 1120 rpm and 28 to 112 mm/min, respectively. The results showed that energy input per length had no effect on the size of stir zone of the FSWed joints. However, at about 1.6 mm subsurface of the plate thickness of the joints, the width of the stir zone was slightly wider at increased energy input per length. From the microscopic investigation, it was found that the grain on the stir zone was slightly larger with increasing energy input per length. Finally, A6063-T831 suffered reduced mechanical properties during the welding. Such reduction seemed to be caused by the dissolution of the precipitate phase in the aluminum alloy. Based on the current study, the dominant factor affecting the strength of the FSWed joints are the grain boundary strengthening and strain hardening.

**Keywords :** Friction Stir Welding / Energy / Grain Size / Stir Zone / Mechanical Properties

* *Corresponding Author : rattana@sut.ac.th*

[1] *Master Student, Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Lecturer, Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering.*

[3] *Assistant Professor, Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering.*

## 1. บทนำ

โลหะผสมอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่นำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่การผลิตโครงสร้างบ้านเรือน ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนอากาศยานและชิ้นส่วนอวกาศยานจนกระทั่งโครงสร้างเรือ รวมไปถึงอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม ท่อ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [1, 2, 3, 4, 5] ในการนำโลหะผสมอลูมิเนียมไปใช้งานด้านโครงสร้างจำเป็นต้องมีการเชื่อมยึดติดชิ้นส่วนโลหะผสมอลูมิเนียมเข้าด้วยกัน การเชื่อมโลหะด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่พัฒนาโดย Thomas และคณะ [6] TWI (The Welding Institute) ในปี ค.ศ.1991 เป็นกระบวนการเชื่อมที่ให้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพเหนือกว่าวิธีการเชื่อมแบบหลอมผสมโดยรอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูง ไม่เกิดแสงและควันในขณะเชื่อม ไม่จำเป็นต้องใช้โลหะเติมในรอยเชื่อม ชิ้นงานบิดเบี้ยวน้อย โดยเฉพาะกับการเชื่อมโลหะเบา ทำให้การเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้รับความสนใจนำมาประยุกต์เชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ผ่านมาผู้วิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของตัวแปรหลักๆ เช่น ความเร็วรอบของการหมุน (rotating speed) ความเร็วในการเคลื่อนที่ (traveling speed) ต่อคุณภาพรอยเชื่อม รวมถึงมุมเอียงของหัวกวนเช่น Karthikeyan และ Balasubramanian [7] ศึกษาผลของความเร็วในการหมุนของหัวกวน (rotating speed) พบว่าความเร็วในการกดหัวกวนลงในเนื้อวัสดุ (plunge rate) ความลึกของการจุ่มหัวกวน (plunge depth) และเวลาในการจุ่มแช่หัวกวน (dwell time) ต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ผลการศึกษาพบว่าความเร็วในการกดหัวกวน (plunge rate) ลงสู่ชิ้นงานมีผลมากที่สุดต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ตามด้วยความลึกของการจุ่มหัวกวน (plunge depth)เวลาในการจุ่ม (dwell time) และความเร็วในการหมุนของหัวกวน (rotating speed) ตัวแปรข้างต้นนั้นเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักรไม่ใช่ตัวแปรทางวิทยาศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางโลหะวิทยาในเนื้อของวัสดุ ทำให้การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงยังขาดความลุ่มลึก อย่างไรก็ตามตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาต่างๆ เหล่านั้นล้วนเกี่ยวข้องกับพลังงานทั้งสิ้น ดังนั้นถ้าทำการวัดพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวนน่าจะทำให้เข้าใจกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในชิ้นงานอลูมิเนียมดีขึ้นด้วย และมีการศึกษาผลของพลังงานต่อคุณภาพรอยเชื่อมยังมีอยู่น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ต่อขนาดของบ่อกวน ขนาดของเกรน และสมบัติทางกล ซึ่งผลการศึกษานี้จะเป็นแนวทางในการเลือกสภาวะในการเชื่อมที่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีคุณภาพสูงขึ้น

## 2. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุและหัวกวน

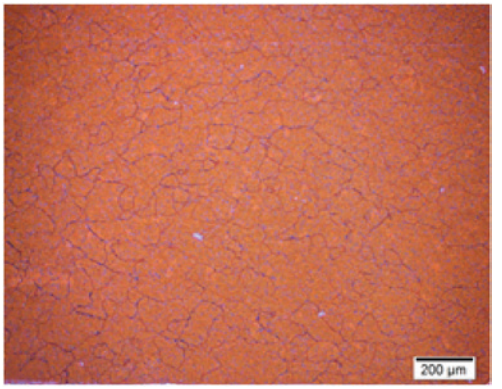
วัสดุที่ใช้ในการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนคือโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A6063-T831 ความหนา 6.4 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 สมบัติทางกลและขนาดเกรนเริ่มต้นดังตารางที่ 2 รวมถึงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนเชื่อม แสดงในรูปที่ 1 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อม กว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หนา 6.4 มิลลิเมตร หัวกวนมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางของบ่า (shoulder) 24 มิลลิเมตร และตัวกวน (pin) เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความสูง 5.7 มิลลิเมตร ผลิตจากเหล็กกล้าขึ้นรูปร้อน H13 ความแข็งหลังการอบชุบ 59 HRC

**ตารางที่ 1** ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอลูมิเนียม

| Grade | Al | Mg | Cr | Si | Mn | Cu | Ni |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6063 | 98.0 | 0.416 | 0.0058 | <1.00 | 0.0445 | 0.0311 | 0.0086 |

**ตารางที่ 2** สมบัติทางกลและขนาดเกรนของโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนเชื่อม

| Grade | AA6063-T831 |
|---|---|
| ความเค้นณ. จุดคราก(MPa) | 160.47 |
| ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa) | 205.62 |
| ขนาดเกรน (μm) | 58 |

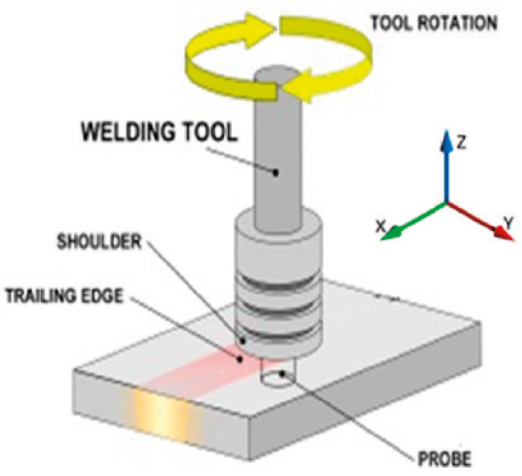



**รูปที่ 1** โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนเชื่อม

**รูปที่ 2** ลักษณะของหัวกวนที่ใช้เชื่อม

### 2.2 การเชื่อม

การเชื่อมจะกระทำในลักษณะเชื่อมบนชิ้นงานแผ่นเดียว โดยความเร็วในการหมุนของหัวกวนระหว่าง 450 ถึง 1120 รอบต่อนาที และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน ระหว่าง 28 ถึง 112 มิลลิเมตรต่อนาที การเชื่อมได้ทำการประยุกต์ใช้เครื่องกัดชิ้นงานแนวราบเพื่อใช้ในการหมุนหัวกวนและจุ่มหัวกวนลงในเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมพร้อมทั้งเคลื่อนที่ไปตามแนวเชื่อม ในลักษณะที่หัวกวนถูกจับยึดกับชุดหมุนของเครื่องกัดชิ้นงานแนวราบ ที่อยู่ด้านบนของชิ้นงาน ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้ตามที่กำหนด จากนั้นทำการปรับแกน Z ของเครื่องเพื่อให้หัวกวนจุ่มลงไปในเนื้อชิ้นงานจนกระทั่งบ่าของหัวกวนสัมผัสกับผิวของชิ้นงานจากนั้นทำการปรับให้แกน X ของเครื่องเคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนดไว้ เมื่อถึงปลายชิ้นงานทำการหยุดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และเคลื่อนที่แกน Z ขึ้นเพื่อยกหัวกวนออกจากชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3 ในการจับชิ้นงานทดลองชิ้นงานจะถูกยึดกับปากกาจับชิ้นงานที่วางอยู่บนฐานของเครื่องกัดชิ้นงานแนวราบ ที่สามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ ใต้ชิ้นงานวางเหล็กกล้าเครื่องมือขึ้นรูปเย็นแผ่น (backing plate) กว้าง 45 มิลลิเมตร หนา10 มิลลิเมตร ไว้เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการทะลุและเป็นตัวระบายความร้อนออกจากชิ้นงานด้วยดังแสดงในรูปที่ 4




**รูปที่ 3** กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

**รูปที่ 4** การจับยึดชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม

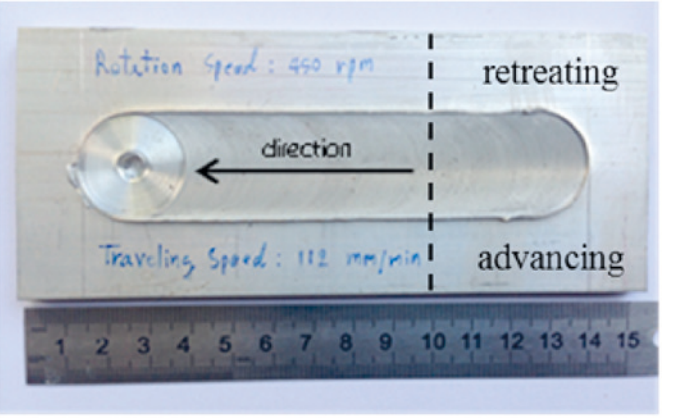
### 2.3 การวัดกระแสไฟฟ้า

ในขณะทำการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยกระบวนการเสียดทานแบบหมุนกวนจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเครื่องกัดชิ้นงานแนวราบ ด้วยแคลมป์มิเตอร์รุ่น Clamp Meter UNI-T UT202 ดังแสดงในรูปที่ 5 ในการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมจะแบ่งการวัดออกเป็นสองแบบคือ 1) วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะทำการเดินเครื่องเปล่าด้วยความเร็วรอบในการหมุนและด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่กำหนดไว้แต่จะไม่ใส่ชิ้นงานเข้าไปในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และ 2) วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมโดยใส่ชิ้นงานในกระบวนการเชื่อม

**รูปที่ 5** การตรวจวัดกระแสในขณะทำการเชื่อม

### 2.4 การตรวจสอบโครงสร้าง

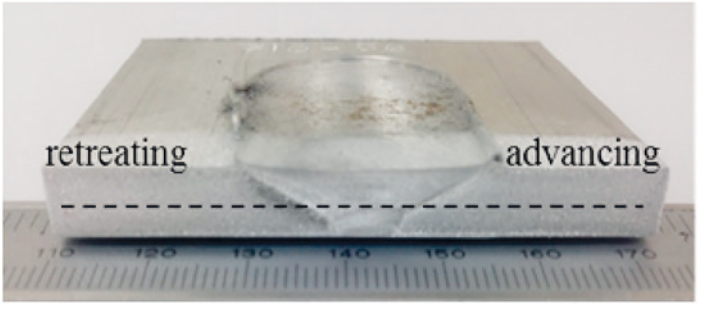
ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำการตัดชิ้นงานตามขวางรอยเชื่อมห่างจากปลายรอยเชื่อมเป็นระยะ 35 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6 หลังจากนั้นขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 ถึง 4000 แล้วตามด้วยขัดผงเพชรบนผ้าสักหลาด ในการตรวจสอบขนาดบ่อกวน ใช้สารกัดขึ้นรอย tucker's ซึ่งมีส่วนผสมดังนี้ กรดไฮโดรคลอริก 45 มิลลิลิตร, กรดไนตริก 15 มิลลิลิตร, กรดไฮโดรฟลูออริก 15 มิลลิลิตร, น้ำ 25 มิลลิลิตร และในการตรวจสอบขนาดของเกรนในรอยเชื่อมใช้สารกัดขึ้นรอย weck's ซึ่งมีส่วนผสมดังนี้ น้ำ 100 มิลลิลิตร, โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 4 กรัม, โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม หลังจากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS BX51M



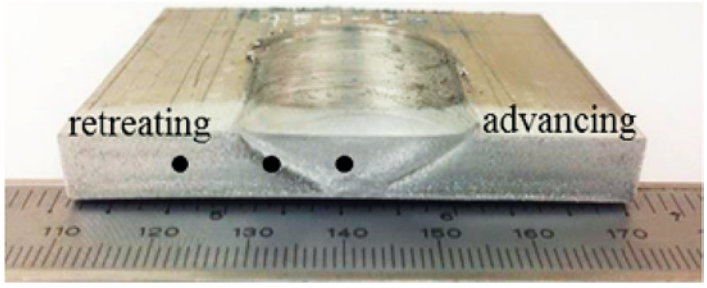

**รูปที่ 6** บริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้าง

### 2.5 การทดสอบสมบัติทางกล

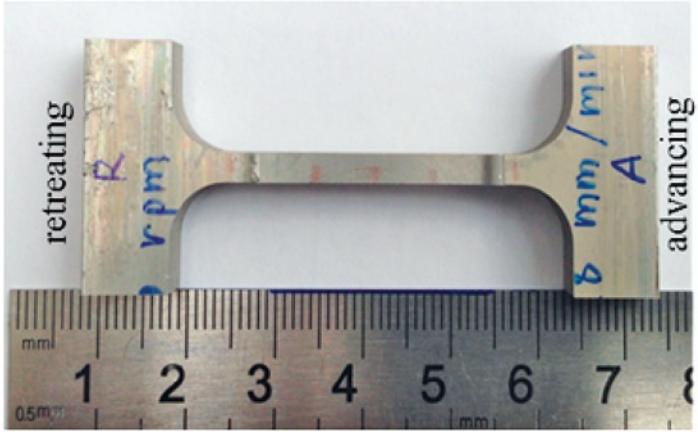
การทดสอบทางกลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) การทดสอบความแข็งซึ่งมีการทดสอบสองลักษณะ คือ 1.1) การทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมตามแนวหน้าตัดขวางรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 71.2) การทดสอบความแข็งในจุดเฉพาะ 3 จุดดังแสดงในรูปที่ 8 โดยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ รุ่น FM800 ยี่ห้อ FUTURE-TECH ใช้แรงในการกด 100 กรัมแรง ระยะเวลาในการคงแรง 10 วินาที และ 2) ทดสอบความแข็งแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบ อินสตอน-ยูนิเวอร์แซลเทสติ้งรุ่น 5582 อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวจับชิ้นงาน 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงถูกตัดในแนวขวางรอยเชื่อม มีรูปทรงแสดงในรูปที่ 9




**รูปที่ 7** ชิ้นงานทดสอบความแข็ง




**รูปที่ 8** ชิ้นงานทดสอบความแข็งบริเวณเฉพาะจุด




**รูปที่ 9** ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 กระแสไฟฟ้าและพลังงาน

ผลการวัดกระแสไฟฟ้าระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสมอลูมิเนียมโดยใช้แคลมป์มิเตอร์ ได้ผลการวัดดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 10 เส้นประแสดงกระแสไฟฟ้าระหว่างการเดินเครื่องเชื่อมเปล่า กราฟเส้นทึบแสดงกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม กราฟเส้นประมีลักษณะเป็นเส้นตรงค่อนข้างขนานแกน x ซึ่งหมายถึงอัตราการจ่ายพลังงานลงชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การเชื่อมที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในขณะเดินเครื่องหัวกวนและแท่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่ โดยไม่ได้รับภาระกรรมทางกลที่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดทำให้การกินกระแสไฟฟ้าของเครื่องกัดชิ้นงานแนวราบคงที่ ขณะที่กราฟเส้นทึบซึ่งแสดงกระแสไฟฟ้าจากการเชื่อมจริงในช่วงแรกกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำและเพิ่มขึ้นด้วยอัตราต่ำและค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงนี้ต่ำกว่าการเดินเครื่องเปล่า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าใช้ไปกับการหมุนของหัวกวนเพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มการเคลื่อนที่ของหัวกวนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ช่วงที่สองกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดซึ่งเป็นช่วงเวลาที่หัวกวนสัมผัสไปที่ชิ้นงานและถูกกดลงจนถึงจุดต่ำสุดหลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อหัวกวนหมุนอยู่กับที่ ช่วงที่สามกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่หลังจากที่หัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ไปได้ระยะหนึ่งจนสุดแนวเชื่อม ช่วงที่สี่เมื่อยกหัวกวนขึ้นและก่อนการปิดการทำงานของเครื่องกัดชิ้นงานแนวราบกระแสไฟฟ้าจะลดลงเป็นลำดับ

จากลักษณะกราฟเส้นทึบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหลังจากหัวกวนเคลื่อนที่ได้ระยะหนึ่งพฤติกรรมพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมค่อนข้างเป็น สภาวะคงตัวสมมุติซึ่งเป็นสภาพที่ทำให้บ่อกวนมีลักษณะคล้ายกันไม่ว่าจะตัดจากหน้าตัดไหนบนชิ้นงานเชื่อม ทำให้ผู้วิจัยเลือกช่วงดังกล่าวมาหาค่าพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมตามแนวเชื่อม โดยผู้วิจัยได้อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานที่กล่าวว่าพลังงานไม่อาจถูกสร้างขึ้นหรือทำลายได้ พลังงานแค่เปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งเท่านั้น ในการทดลองนี้พลังงานไฟฟ้าที่วัดจากกระแสไฟฟ้าเข้าเครื่องกัดชิ้นงานแนวราบเปลี่ยนไปเป็นพลังงานในรูปต่างๆ ดังสมการ (1)

$$E_I = E_{workpiece} + E_{ground} + E_{lose} \quad (1)$$

เมื่อพลังงานขาเข้า ($E_I$) มีค่าเท่ากับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อม ($E_{workpiece}$) พลังงานที่เครื่องกัดชิ้นงานแนวราบใช้เป็นขั้นต่ำ ($E_{ground}$) พลังงานที่สูญเสียไป ($E_{lose}$) ในรูปต่างๆ เช่น ความร้อนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของเครื่องจักรหรือสูญเสียไปกับอุปกรณ์ของเครื่องจักรและอื่นๆ และเพื่อประเมินหาพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานผู้วิจัยจึงต้องประเมินค่าพลังงานขั้นต่ำที่เครื่องกัดชิ้นงานแนวราบต้องการและพลังงานที่เกิดการสูญเสียทั้งหมดจากพลังงานการเดินเครื่องเปล่า ซึ่งถ้าผู้วิจัยสมมุติให้ $E_{lose}+E_{ground}$ ของทั้งสองกรณีการเชื่อมเท่ากัน เมื่อนำค่าพลังงานทั้งสองมาหักลบกันจะทำให้ได้พลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อม ดังสมการที่ 2

$$E_{I\,(load)} - E_{I\,(free\ load)} = E_{workpiece} \quad (2)$$

อนึ่งในการคำนวณค่าพลังงานจากค่ากระแสไฟฟ้าผู้วิจัยได้ใช้สมการที่ (3) ในการคำนวณพลังงานเข้าสู่ w, จากกระแสไฟฟ้า

$$E_{@1\,m} = \frac{V\int_0^{end}\Delta I dt}{t_{total}} x t_{@1\,m} \quad (3)$$

เมื่อ $E_{@1m}$ = พลังงานเชื่อมในระยะทาง 1 เมตร
$t_{@1m}$ = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ 1 เมตร
$t_{total}$ = เวลาทั้งหมด
$\Delta I$ = ผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมสองกรณี
V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากผลคำนวณพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทาง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 โดยรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางกับความเร็วรอบในการหมุน รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน เมื่อพิจารณารูปที่ 11 และ 12 จะพบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนมีผล อย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานระหว่างการเชื่อม เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนต่ำลงพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ความเร็วในการหมุนของหัวกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ไม่ส่งผลมากนัก

จากสมการฟลักซ์ความร้อนในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ H Schmidt และคณะ [8] พบว่าฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อมลงสู่ชิ้นงานเชื่อมสามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$q_m = \frac{2}{3}\pi\omega\mu P(R_{shoulder}^2 + 3R_{probe}^2 + H_{probe}) \quad (4)$$

เมื่อ $\omega$ = ความเร็วในการหมุนของหัวกวน
$\mu$ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
P = แรงกดของหัวกวน
$R_{shoulder}$ = รัศมีบ่าของหัวกวน
$R_{probe}$ = รัศมีหัวกวน
$H_{probe}$ = ความสูงของหัวกวน

แต่ด้วยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้ค่าพลังงานในรูปของพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพื่อให้สมการของ H Schmidt มีความสอดคล้องกับงานวิจัย สมการฟลักซ์ความร้อนดังกล่าวต้องถูกแปลงโดยคูณด้วย $1/\nu$ ซึ่ง $\nu$ แทนความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน และได้สมการที่ (5)

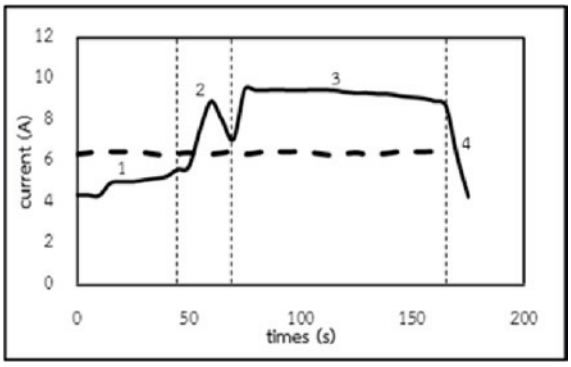
$$q_m = \frac{2}{3}\frac{\pi\omega\mu P}{\nu}(A_{tool}) \quad (5)$$

โดย

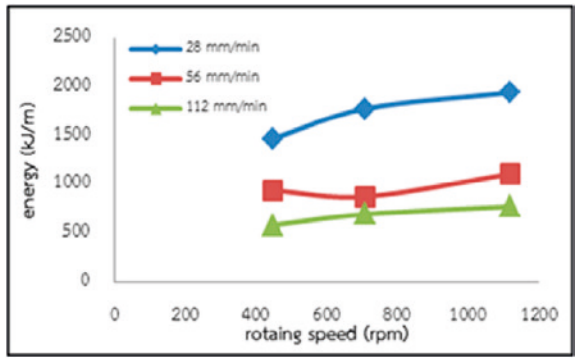
$$A_{tool} = (R_{shoulder}^2 + 3R_{probe}^2 + H_{probe})$$

จากสมการพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางมีดังนี้ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน

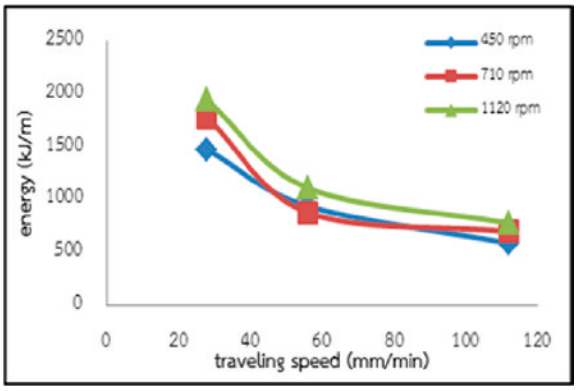
($\nu$) ความเร็วในการหมุนของหัวกวน ($\omega$) สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ($\mu$) และแรงกดของหัวกวน (P) และเมื่อผู้วิจัยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนของความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน ($\omega/\nu$) กับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หมายความว่าเมื่อ $\omega/\nu$ เพิ่มขึ้น พลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้เราทราบได้ว่าไม่ว่าพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อความยาวมากแค่ไหนค่า $\mu$P หรือ ค่าความเค้นเฉือน ณ ผิวสัมผัสหัวกวนกับชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงเพราะค่าความชันของกราฟคงที่ตลอดช่วงการศึกษา ดังนั้นจากรูปที่ 13 จึงสรุปได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อพลังงานความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง ในช่วงสภาวะการเชื่อมในการศึกษานี้มีเพียงแค่ ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นความเค้นเฉือนของหัวกวนกับชิ้นงานก็ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางด้วย



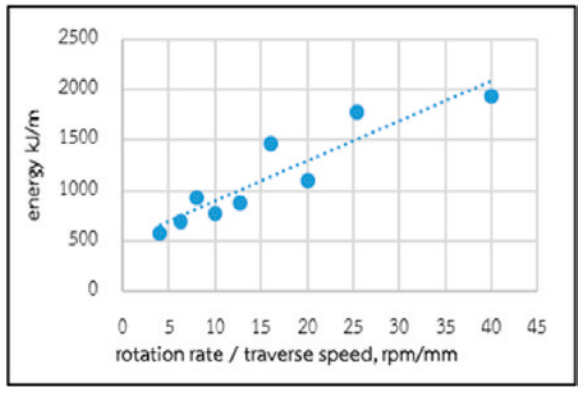

**รูปที่ 10** ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อม




**รูปที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการหมุนกับพลังงานกรณีการเชื่อม $\omega$ = 1120 rpm,$\nu$ = 56 mm/min




**รูปที่ 12** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนกับพลังงาน

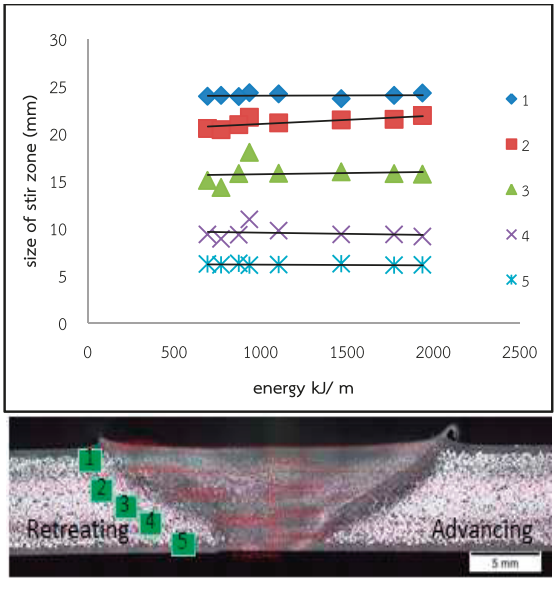



**รูปที่ 13** ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวน/ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนกับพลังงาน

### 3.2 ขนาดของบ่อกวน

ขนาดบ่อกวนในการศึกษานี้ คือ บริเวณที่พบความแตกต่างหลังการกัดกรดด้วยน้ำยากัดกรดเพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคดังแสดงในรูปที่ 14 ล่าง ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่เกรนของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมเกิดการเสียรูปรุนแรงและส่วนใหญ่เกิดการตกผลึกใหม่ให้เกรนขนาดเล็ก และเมื่อนำขนาดความกว้างของบ่อกวนตามแนวต่างๆ ของภาคตัดขวางงานเชื่อมดังกล่าวมาสร้างความสัมพันธ์กับค่าพลังงานที่ลงสู่

ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางจะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 14 จากรูปที่ 14 จะพบว่าเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมเพิ่มขึ้นขนาดของบ่อกวนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในเกือบทุกแนวการวัดไม่ว่าจะเป็นบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงานกับบ่าหัวกวนด้านบนสุด หรือบริเวณกลางชิ้นงานรวมถึงด้านล่างของบ่อกวน ยกเว้นบริเวณแนวการวัดที่ 2 ซึ่งเป็นบริเวณใต้บ่าหัวกวนลงมาประมาณ 1/4 ของความหนาชิ้นงาน ขนาดของบ่อกวนจะกว้างขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบ่อกวนที่พบในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการศึกษานี้เป็นบริเวณที่เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรนของโลหะผสมอลูมิเนียมหรือเกิดการเสียรูปอย่างรุนแรงซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อเป็นบริเวณที่มีการเสียรูปที่รุนแรงมากและมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิตกผลึกใหม่ของโลหะผสมอลูมิเนียมเกรดนั้น แต่ด้วยในการศึกษานี้เราพบว่าค่า μP หรือ ค่าความเค้นเฉือน ณ ผิวสัมผัสหัวกวนกับชิ้นงานเชื่อมไม่เปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความเค้นเฉือน ณ ผิวสัมผัสหัวกวนกับชิ้นงาน คือ ค่าที่สื่อถึงแรงในการกวนเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมในบ่อกวน เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการเชื่อมทำให้เราพบว่าพฤติกรรมการเสียรูปอย่างรุนแรงในทุกสภาวะการเชื่อมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ และขนาดของบริเวณที่เกิดการเสียรูปรุนแรงและตกผลึกใหม่ปริมาณมากนี้ก็ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญด้วย ทำให้ขนาดบ่อกวนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญเช่นกัน อนึ่งในแนวการวัดความกว้างบ่อกวนแนวที่ 2 ขนาดบ่อกวนกว้างขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางเพิ่มขึ้นน่าจะเกิดจากการความเค้นเฉือน ณ ผิวด้านบนของบ่อกวนใกล้เคียงกัน แต่ด้วยภายในบ่อกวนมีการอ่อนตัวของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพิ่มขึ้นทำให้ ณ ความลึกหนึ่งจากผิวสัมผัสของชิ้นงานกับหัวกวนสามารถเกิดการขยายตัวเล็กน้อยของบริเวณที่มีการกวนรุนแรงได้และเกิดการตกผลึกเป็นเกรนขนาดเล็ก




**รูปที่ 14** ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ลงสู่รอยเชื่อมกับขนาดบ่อกวน

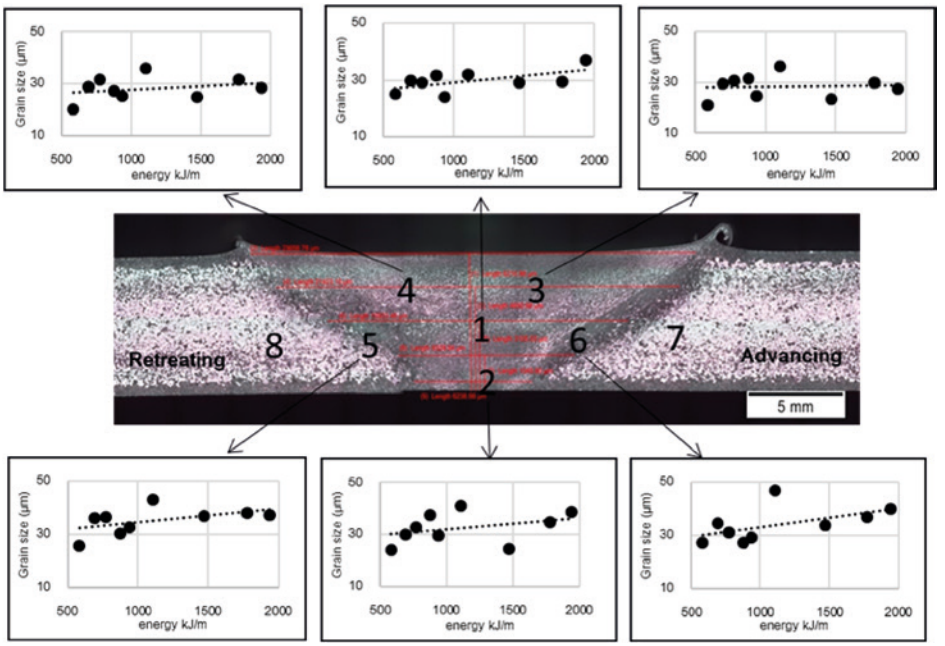
### 3.3 ขนาดเกรน

การตรวจวัดขนาดของเกรนแบ่งออกเป็น 8 บริเวณ อยู่ภายในบ่อกวน 6 บริเวณ โดยจะวัดด้าน retreating 2 บริเวณ ด้าน advancing 2 บริเวณ ด้านล่าง 1 บริเวณ และกลางชิ้นงาน 1 บริเวณ ส่วนอีก 2 บริเวณ อยู่นอกบ่อกวน ทั้งนี้บริเวณขอบบ่อกวนไม่สามารถวัดขนาดเกรนได้เนื่องจากเกรนเกิดการเสียรูปอย่างรุนแรงขอบเกรนเห็นไม่ชัดมีลักษณะยืดยาวตามความเค้นแรงเฉือนที่ได้รับ หลังจากวัดขนาดเกรนแล้วผู้วิจัย

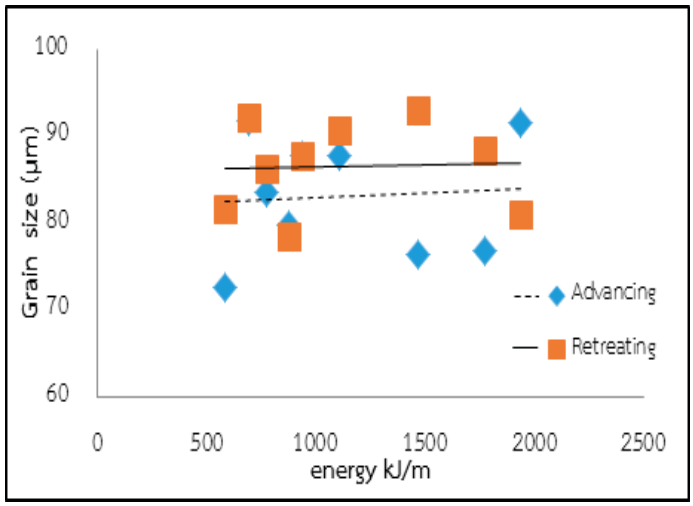
ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์กับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางกับขนาดเกรนในบ่อกวน ดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่าขนาดของเกรนในบ่อกวนทุกบริเวณที่ทำการวัดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพิ่มสูงขึ้น และขนาดเกรนที่พบยังมีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนเดิมของชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมอยู่มาก ที่เป็นเช่นนี้ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าน่าจะเกิดจากเนื้อโลหะในบ่อกวนได้รับความเค้นเฉือนจึงเกิดการเสียรูป ขณะเดียวกันเนื้อโลหะบริเวณดังกล่าวก็ได้รับพลังงานความร้อนและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะเกิดการตกผลึกใหม่ ส่งผลให้เกรนที่เสียรูปเกิดการตกผลึกใหม่ ทำให้ขนาดเกรนบริเวณดังกล่าวมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับขนาดเกรนเริ่มต้นของชิ้นงาน แต่ด้วยระดับความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างหัวกวนกับชิ้นงานไม่แตกต่างกันในทุกสภาวะการเชื่อมดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางค่า $\omega/v$ ดังนั้นขนาดเกรนซึ่งปกติขึ้นกับระดับการเสียรูปและระดับของความร้อนนั้นจึงขึ้นกับปัจจัยด้านความร้อนเป็นหลักเพียงอย่างเดียวทำให้ ณ สภาวะการเชื่อมที่พลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางที่สูงขึ้นขนาดเกรนจึงโตกว่าระดับพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางที่น้อยกว่า

สำหรับขนาดเกรนนอกบ่อกวนบริเวณฯหมายเลข 7 และ 8 ที่ยังอยู่ในบริเวณที่เกรนมีการเสียรูปแบบถาวรและมีการตกผลึกบ้างในระดับต่ำ (4 มิลลิเมตรจากขอบบ่อกวน) ขนาดเกรนจะใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 16 ขณะที่ถ้าทำการเปรียบเทียบขนาดเกรนนอกบ่อกวนกับขนาดเกรนในบ่อกวนและขนาดเกรนเริ่มต้นพบว่าขนาดเกรนบริเวณนอกบ่อกวนจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเกรนบริเวณในบ่อกวน และใหญ่กว่าขนาดเกรนเริ่มต้น โดยขนาดเกรนบริเวณนอกบ่อกวนที่พบมีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 72 ถึง 95 ไมโครเมตร ขณะที่ขนาดเกรนเริ่มต้นของโลหะผสมอลูมิเนียมมีขนาด 60 ไมโครเมตร โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 17 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวได้รับผลกระทบจากความร้อนแต่ด้วยการเสียรูปไม่เพียงพอให้เกิดการตกผลึกใหม่สมบูรณ์ทั้งหมดจึงทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรนควบคู่กับการโตของเกรน และอาจมีการเสียรูปบ้างเล็กน้อย

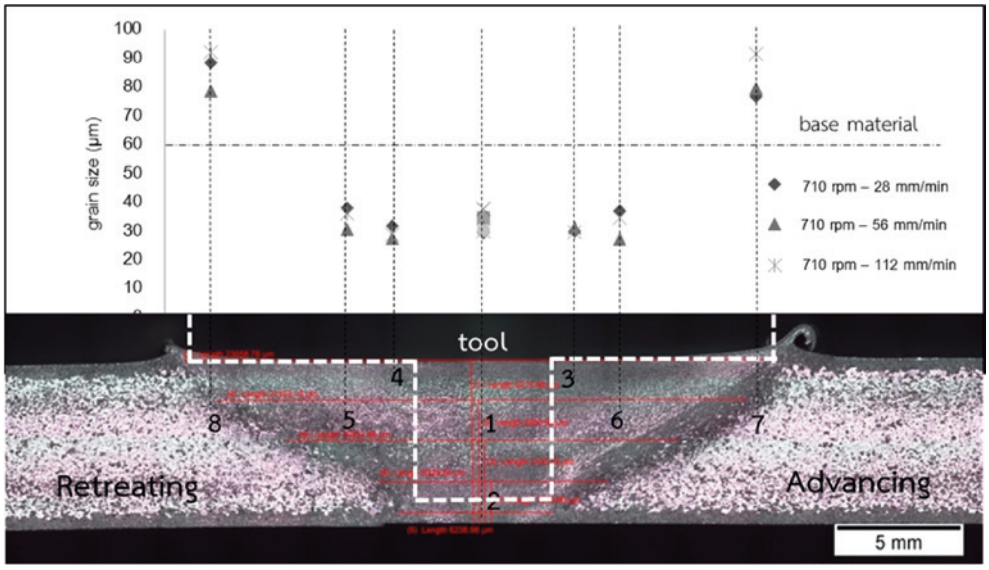
นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าขนาดเกรนนอกบ่อกวนด้าน retreating จะใหญ่กว่าขนาดเกรนนอกบ่อกวนด้าน advancing เล็กน้อยและพบชั้นเสียรูปรุนแรงด้าน advancing ที่หนากว่า retreating ดังรูปที่ 16 อีกด้วย




**รูปที่ 15** ขนาดเกรนบริเวณในบ่อกวนเปรียบเทียบกับพลังงาน




**รูปที่ 16** ขนาดเกรนบริเวณนอกบ่อกวนห่างจากบ่อกวน 4 มิลลิเมตร กับพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง



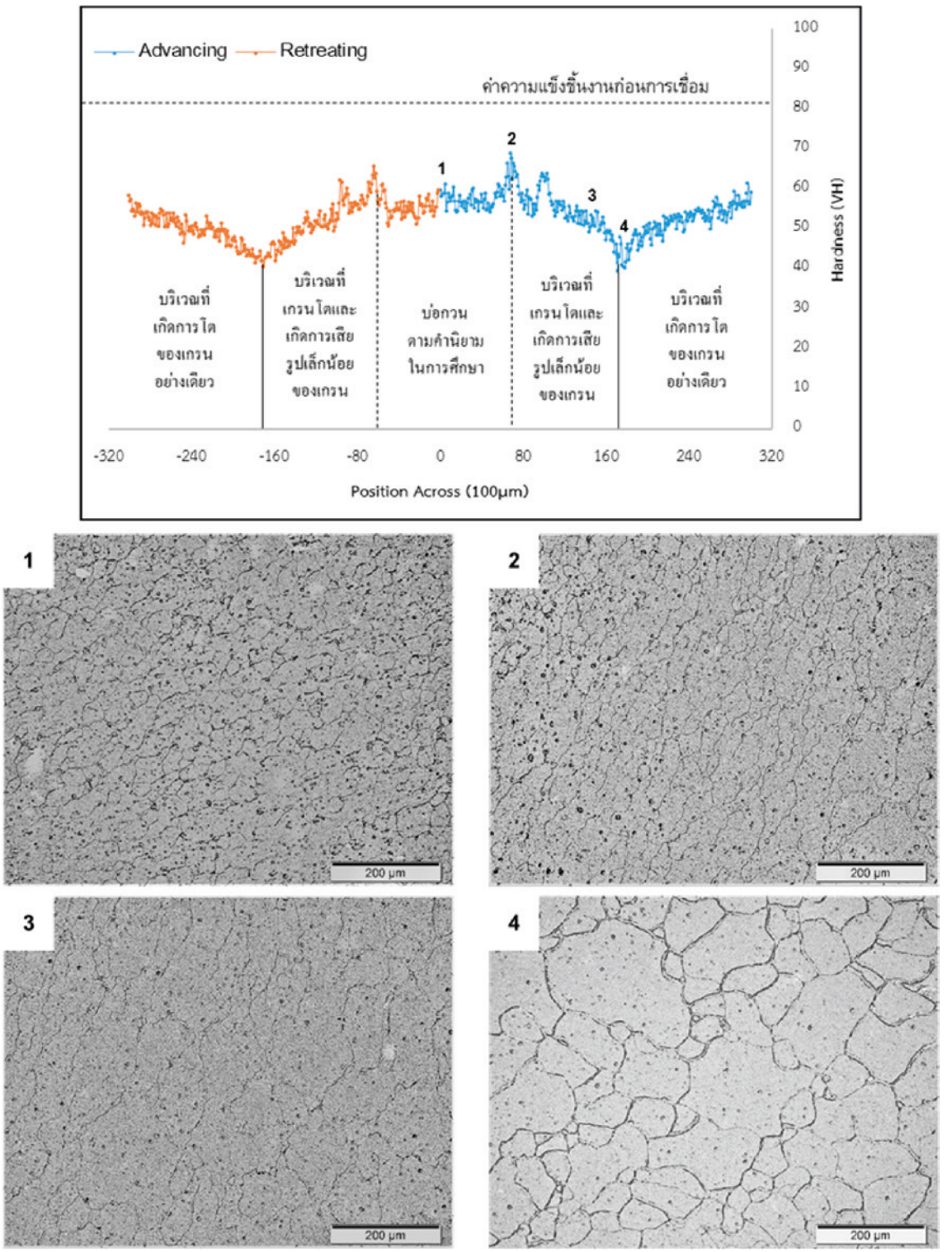

**รูปที่ 17** ขนาดเกรนบริเวณต่างๆ ของรอยเชื่อมที่ได้จากสภาวะการเชื่อม $\omega$= 710 rpm, $\nu$=28, 56, 112 mm/minเมื่อ $\omega$ คือ ความเร็วในการหมุนของหัวกวน (rpm) และ $\nu$ คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่หัวกวน (mm/min)

### 3.4 สมบัติทางกล

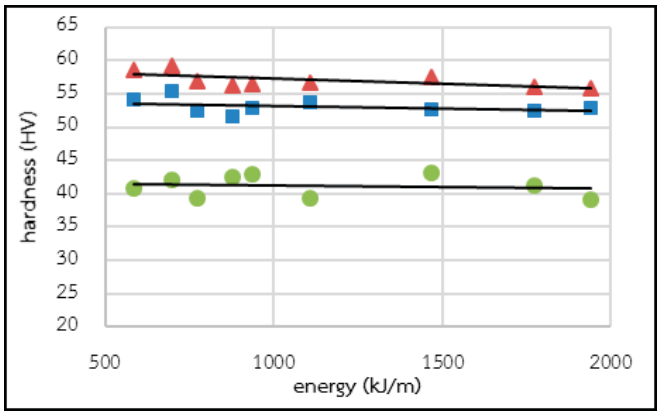
#### 3.4.1 การทดสอบความแข็ง

ด้วยโลหะผสมอลูมิเนียมเกรดที่นำมาศึกษานั้นผ่านกระบวนการบ่มเทียมพร้อมทำการขึ้นรูปทางกล ส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานก่อนการเชื่อมขึ้นกับกลไกการเพิ่มความแข็งแรงอย่างน้อย 3 กลไก คือ 1) การตกตะกอนของแข็งของสารประกอบเชิงโลหะขนาดเล็ก 2) การเพิ่มปริมาณของขอบเกรน และ 3) การเพิ่มความเครียด ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมมาผ่านกระบวนการเชื่อมทำให้ความแข็งของชิ้นงานเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของอิทธิพลของกลไกทั้ง 3 ประเภท ดังแสดงลักษณะการกระจายตัวของความแข็งในแนวตัดขวางชิ้นงานดังรูปที่ 18 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม พบว่าบริเวณบ่อกวนมีค่าความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมใกล้เคียงกันทั้งบ่อกวน โดยค่าความแข็งที่วัดได้ต่ำกว่าค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนการเชื่อมประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ และค่าความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมในด้าน advancing คล้ายจะสูงกว่าด้าน retreating เล็กน้อย ส่วนขอบของบ่อกวนนั้นค่าความแข็งจะสูงขึ้นจากบริเวณบ่อกวนอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับบริเวณถัดจากขอบบ่อกวนออกมาค่าความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำสุดที่ระยะห่างจากขอบบ่อกวนประมาณ 8 มิลลิเมตร จากนั้นค่าความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมตามแนวขวางรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างออกจากบ่อกวนที่เพิ่มมากขึ้นแต่ยังมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าความแข็งชิ้นงานเริ่มต้น จากลักษณะการกระจายตัวของความแข็งในแนวเชื่อม ถ้านำไปสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคที่พบในหัวข้อก่อนและแสดงในรูปที่ 18 นั้น สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งตามแนวขวางรอยเชื่อมได้ดังนี้ ด้วยชิ้นงานเชื่อมในการศึกษานี้พบการโตของเกรนนอกบ่อกวนทั้งหมด ทำให้เห็นว่าอุณหภูมิของชิ้นงานทั้งชิ้นขณะทำการเชื่อมต้องมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการตกตะกอนของแข็งใหม่ของแอลฟาเฟสแน่นอน กล่าว คือ สูงกว่า 0.4-0.5 เท่าของอุณหภูมิหลอมเหลวในหน่วยสัมบูรณ์ของโลหะผสมอลูมิเนียม ดังนั้นความร้อนจากงานเชื่อมน่าจะทำให้อุณหภูมิของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมทุกบริเวณสูงมากจนทำให้ ตะกอนของแข็งของสารประกอบเชิงโลหะขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการบ่มเทียมเกิดการโตแยกตัวจากโครงผลึกของแข็งเดิมหรือที่รู้กันในนาม Overaging หรือไม่ก็เกิดการละลายกลับของตะกอนของแข็งที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะเหล่านั้นกลับเข้าสู่เนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นด้วยกลไกการตกตะกอนของแข็งของสารประกอบเชิงโลหะขนาดเล็กลดบทบาทลงอย่างมาก เมื่อเป็นเช่นนี้ความแข็งของชิ้นงานเชื่อมในการศึกษานี้จึงขึ้นกับกลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากการเพิ่มขอบเกรนและการเพิ่มความเครียดเป็นหลักเท่านั้น เมื่อพิจารณาบริเวณในบ่อกวนซึ่งความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมค่อนข้างใกล้เคียงกันและเพิ่มขึ้นอย่างมาก ณ บริเวณขอบบ่อกวนที่เป็นเช่นนี้ เพราะขนาดเกรนในบ่อกวนใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 15 และลักษณะการเสียรูปของเกรนไม่ต่างกันมาก ณ บริเวณขอบบ่อกวนเกิดการเสียรูปของเกรนค่อนข้างมาก ดังรูปที่ 18 ความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมบริเวณนั้นจึงเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มความเครียดเป็นหลัก ส่วนบริเวณที่ห่างจากขอบบ่อกวนออกไปจนถึงจุดต่ำสุดของค่าความแข็งที่วัดได้ในรูปที่ 18 ความแข็งลดลงเพราะลักษณะการเสียรูปของเกรนค่อยๆ ลดลงตามระยะห่างจากขอบบ่อกวนที่มากขึ้นพร้อมกับเกรนบริเวณดังกล่าวโตกว่าบริเวณในบ่อกวนมากๆ ทำให้ความแข็งลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่มีความแข็งต่ำสุดซึ่งจะไม่พบการเสียรูปของเกรนแอลฟา แต่พบการโตของเกรนเพียงอย่างเดียว และการโตของเกรนจะลดลงที่ระยะห่างจากจุดดังกล่าวมากขึ้น ทำให้ความแข็งของชิ้นงานขึ้นอยู่กับกลไกการการเพิ่มของขอบเกรนเป็นหลัก

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทาง ณ บริเวณกลางบ่อกวน ขอบของบ่อกวน และบริเวณนอกบ่อกวนบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 19 พบว่าเมื่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าความแข็งบริเวณกลางบ่อกวนและขอบบ่อกวนมีการลดลงเล็กน้อยตามขนาดของเกรนแอลฟาที่ใหญ่ขึ้น ส่วนบริเวณนอกบ่อกวนมีค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 19 อาจเนื่องมาจากการโตของเกรนที่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางที่ตำแหน่งดังกล่าวไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของความแข็งที่วัดได้




**รูปที่ 18** ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีการเชื่อมความเร็วรอบในการหมุน 1120 rpm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 56 mm/min

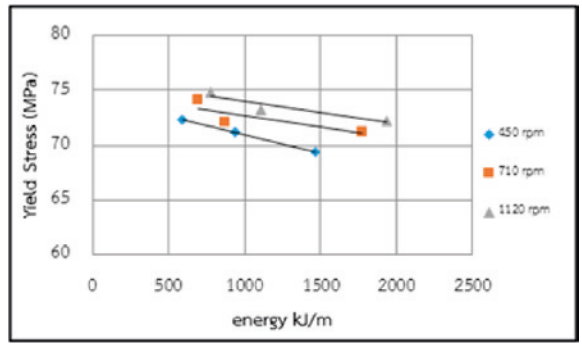



**รูปที่ 19** ความสัมพันธ์ของพลังงานลงสู่งานเชื่อมต่อระยะทางกับความแข็งบริเวณ กลางบ่อกวน (จุดสี่เหลี่ยม) ขอบบ่อกวน (จุดสามเหลี่ยม) และห่างจากขอบบ่อกวนไประยะทาง 8 มิลลิเมตร (จุดวงกลม) ตามแนวกลางความหนาของชิ้นงานเชื่อม

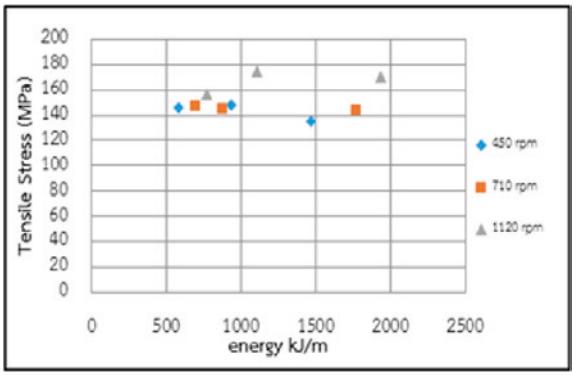
### 3.4.2 การทดสอบแรงดึง

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมในสภาวะต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบความเค้นจุดครากและความแข็งแรงดึงสูงสุดกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางที่สภาวะต่างกัน พบว่าเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นความเค้นจุดครากลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 20 ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 21 และความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมทุกสภาวะต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนการเชื่อมทุกชิ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะชิ้นงานเชื่อมได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน และทางกลทำให้สมบัติของเชิงกลเปลี่ยนแปลงไป

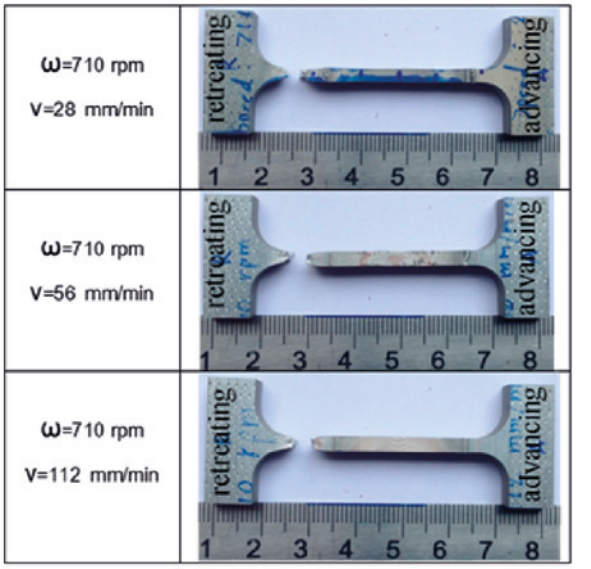
สำหรับลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเชื่อม หลังการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าชิ้นงานเชื่อมเกิดการแตกหัก ณ บริเวณนอกรอยเชื่อมฝั่ง retreating ในทุกสภาวะการเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 22 นอกจากนี้จากผิวรอยแตกในรูปที่ 23 ซึ่งแสดงผิวรอยแตกในชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนเชื่อมและ รูปที่ 24 แสดงผิวรอยแตกในชิ้นงานเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม ถ้าทำการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่ารอยแตกหักทั้งสองแสดงการแตกหักแบบเหนียว และการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเชื่อมจะมากกว่าของโลหะผสมอลูมิเนียมเริ่มต้น นอกจากนี้ขนาดของดิมเบิลเฉลี่ยที่พบในชิ้นงานเชื่อมเท่ากับ 5 ไมโครเมตรซึ่งมีขนาดละเอียดกว่าในชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมเดิมเล็กน้อยซึ่งเท่ากับ 7 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 25 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวัดขนาดเกรนนอกบ่อกวนข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 17 ขนาดของเกรนฝั่ง retreating มีขนาดใหญ่กว่าขนาดเกรนฝั่ง advancing ทำให้ชิ้นงานด้าน retreating มีความแข็งแรงต่ำกว่าด้าน advancing



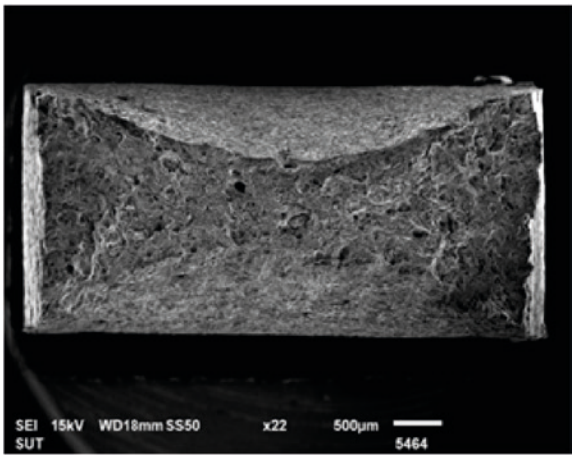

**รูปที่ 20** ความสัมพันธ์ของพลังงานกับความเค้นจุดคราก



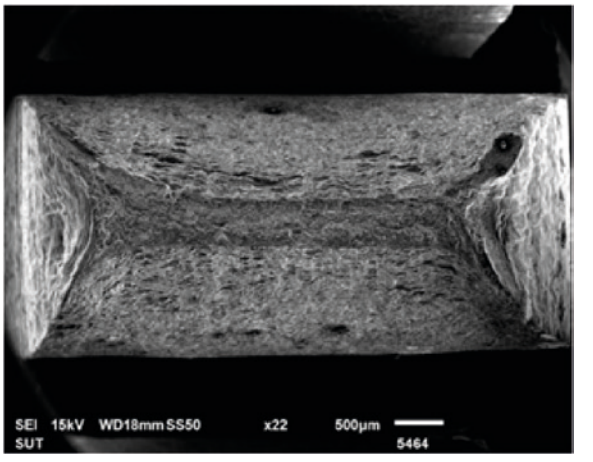

**รูปที่ 21** ความสัมพันธ์ของพลังงานกับความแข็งแรงดึง




**รูปที่ 22** ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง




**รูปที่ 23** รอยแตกหักของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเชื่อม




**รูปที่ 24** รอยแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม

## 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของพลังงานที่ลงสู่รอยเชื่อมในการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวน ต่อขนาดของบ่อกวน ขนาดของเกรน และสมบัติเชิงกล ได้ผลการศึกษาดังนี้

1) ปริมาณพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพิ่มขึ้นไม่มีนัยยะสำคัญต่อขนาดของบ่อกวนโดยรวม แต่ส่งผลต่อความกว้างบริเวณใต้บ่าหัวกวนลงมาประมาณ 1/4 ของความหนาชิ้นงานโดยที่ขนาดของบ่อกวนจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

2) ขนาดของเกรนในชิ้นงานเชื่อมต่างๆขึ้นกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเล็กน้อย โดยขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางเพิ่มขึ้น

3) สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด

A6063-T831 นี้ขึ้นกับปรากฏการณ์ทางความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมซึ่งส่งผลให้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงที่ใช้เพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนการเชื่อมเปลี่ยนไป และจากการศึกษานี้ชิ้นงานขณะทำการเชื่อมได้รับอุณหภูมิสูงจนทำให้กลไกที่ควบคุมความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมหลักมีเพียงสองกลไก คือ กลไกการเพิ่มความแข็งแรงขอบเกรน และกลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด

## 5. เอกสารอ้างอิง


1. Reinhold, B. and Angermann, K., 2009,"Composite Materials in the Automotive Industry New System Solutions for Complex Requirement Profiles," pp. 27-38, in W. Krenkel (Ed.) *Verbundwerkstoffe (Composites)*, Vol. 17, Wiley-VCH GmbH & Co.KGaA, Weinheim.

2. Wahba, M., Kawahito, Y., Katayama, S.and Mater, J.,2011, "Laser Direct Joining of AZ91D Thixomolded Mg Alloy and Amorphous Polyethylene Terephthalate," *Journal of Materials Processing Technology*, 211, pp. 1166–1174.

3. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., 2005, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering*, 50 (1-2), pp. 1-78.

4. Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia, H.K.D.H., 2008, "Recent Advances in Frictionstir Welding ProcessWeldment Structure and Properties," *Materials Science*, 53 (6), pp. 980-1023.

5. Rojananan, S., Thipprakmas, S., Rojananan, S., Chairuangsri, T. and Imurai, S., 2008, "Effect of Cold Working and Annealing on Springback Behavior in Aluminium Sheet," *KMUTT Research and Development Journal*, 31 (2), pp. 411-424.

6. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J., 1991, Patent Application No.9125978.8.

7. Karthikeyan, R. and Balasubramanian, V.,2010, "Predictions of the Optimized Friction Stir Spot Welding Process Parameters for Joining AA2024 Aluminum Alloy Using RSM," *Advance Manufacturing Technology*, pp. 173–83.

8. Schmidt, H., Hattel, J. and Wert, J.,2004, "An Analytical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12 (1), pp. 143–157.