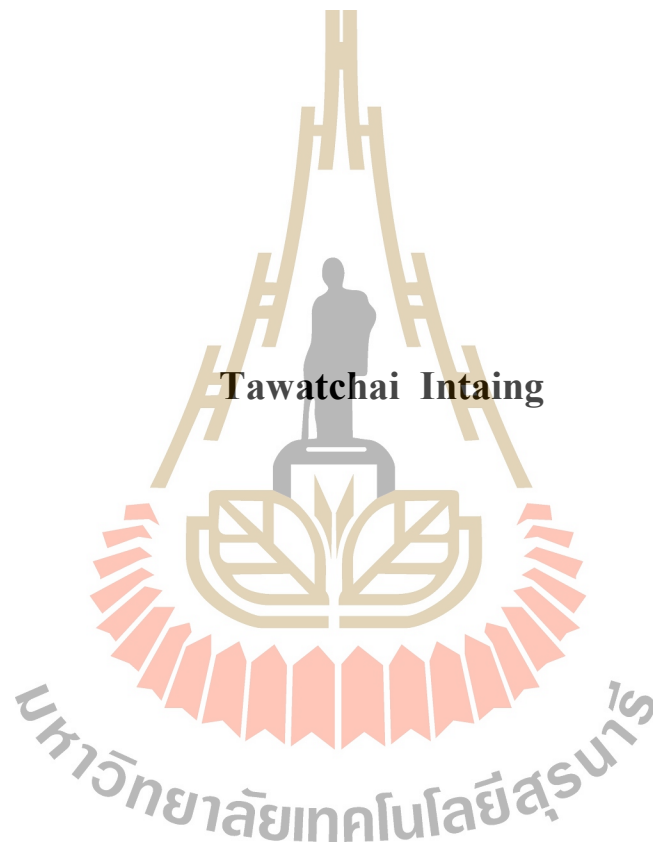


การเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะกับพลาสติกด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบ
หมุนกวน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**DISSIMILAR MATERIALS JOINING BETWEEN
METAL AND PLASTIC BY FRICTION
STIR WELDING**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะกับพลาสติกด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนวน


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(ผศ. ดร. รุชนีย์ พิชรวิชญ์)

ประธานกรรมการ




(ผศ. ดร. รัตน์ บริสุทธิ์กุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. ปัญญา บัวสมบุรา)

กรรมการ



(อ. ดร. ปิยิต มิตรสมหวัง)

กรรมการ



(อ. ดร. วราภรณ์ ปิยวิทย์)

กรรมการ



(ศ. ดร. ถันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนศักร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิชัชชัย อินเทียง : การเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่าง โลหะกับพลาสติกด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวน (DISSIMILAR MATERIALS JOINING BETWEEN METAL AND PLASTIC BY FRICTION STIR WELDING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตน์ บริสุทธิ์กุล, 90 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการกวนเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียม และการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เพื่อศึกษาผลกระทบของพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมซึ่งสัมพันธ์กับสถานะการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของรอยเชื่อม รวมถึงสร้างความเข้าใจกลไกการเชื่อมติดระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากการศึกษาพบว่าในการกวนเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียม พลังงานความร้อนต่อระยะทางในการกวนเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนเพิ่มขึ้น และพลังงานความร้อนต่อระยะทางในการกวนลดลงอย่างมีนัยยะเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนเพิ่มขึ้น เกรนบริเวณในบ่อกวนมีขนาดเล็กกว่าเกรนเริ่มต้นแต่เมื่อพลังงานความร้อนต่อระยะทางในการกวนที่ลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเกรนโตขึ้น ในขณะที่เกรนนอกบ่อกวนมีขนาดใหญ่กว่าเกรนเริ่มต้น และขนาดเกรนฝั่ง retreating โตกว่าเกรนฝั่ง advancing ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณที่เกิดการแตกหัก และการโตของเกรนในบริเวณกระทะร้อนทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังกวนลดต่ำลง สำหรับการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่าความเร็วในการกดหัวเชื่อมลงสู่ชิ้นงานและความหนาผิวหน้าสัมผัสส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม แม้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดจะทำให้ได้รอยเชื่อมระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แต่รอยเชื่อมยังไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการพัฒนาในลำดับถัดไป สุดท้ายการกวนโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงถือถึงกลไกการเชื่อมติดที่ต่างกันทำให้ผลของตัวแปรงานเชื่อมมีความสัมพันธ์ต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมในลักษณะต่างกัน

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา ศัษชัย อินเทียง

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รัตน บริสุทธิ์กุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม วิภากร วัฒนกุล

TAWATCHAI INTAING : DISSIMILAR MATERIALS JOINING BETWEEN
METAL AND PLASTIC BY FRICTION STIR WELDING. THESIS

ADVISOR : ASST.PROF. RATTANA BORRISUTTHEKUL, Ph.D., 90 PP.

FRICTION STIR WELDING/FRICTION STIR SPOT WELDING/ALUMINIUM
ALLOYS/HIGH DENSITY POLYETHYLENE/SIMILAR MATERIALS
/DISSIMILAR MATERIALS

In the present study, the friction stir welding processing was used to stir the aluminum alloy and to spot weld aluminum alloy and high density polyethylene in order to study the effects of energy input per unit length corresponded with welding parameters on properties of welds as well as in order to understand the welding mechanism. From the results, in the stir of aluminum alloy, both increasing the tool rotation speed and decreasing traveling speed increased the energy input per unit length to the aluminum alloy. Grains size in the stir zone was smaller than base metal. When increasing in energy input per unit length, larger grain size at stir zones was obtained. While grains outside stir zone was larger than base metal and grain size at retreating side was slightly larger than advancing side, which corresponds to the fracture area. Also the grain growth at heat affected zone caused the low strength of the welds. For welding aluminum alloy with high density polyethylene, we found that both plunging speed and thickness of weld edge affected the high density polyethylene protruded pin size and shape which locked into the holes of aluminum alloys. The size and shape of

protrude pin effected the changed of strength of welds. However, friction stir spot welding could be used for welding between the aluminum alloy and the high density polyethylene, the weld were insufficiently strong enough. Thus, in the future, novel technique should be developed. Finally, the different bonding mechanisms, might resulted in a different of the effect of welding parameter on the strength of the weld.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature ศิวชัย อิ่มพันธ์

Advisor's Signature ดร. นงนุช

Co-Advisor's Signature ดร. นงนุช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	7
1.3 สมมติฐานการวิจัย	7
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.6 รายการอ้างอิง.....	8
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 บทนำ.....	10
2.2 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding).....	11
2.2.1 ตัวแปรในการเชื่อม	13
2.2.2 ลักษณะที่เกิดขึ้นบริเวณต่างๆของรอยเชื่อมด้วยวิธีการ FSW.....	14
2.3 การเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar material welding).....	15
2.4 การเชื่อมโลหะต่างชนิดและการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะกับพลาสติก (dissimilar material welding).....	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	รายการอ้างอิง.....	36
3	การปั่นกวนโลหะผสมอลูมิเนียม A6063-T831 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	
	(Stir on the Plastic to A6063-T831 by Friction Stir Welding)	38
3.1	บทคัดย่อ	38
3.2	บทนำ.....	38
3.3	ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	39
3.3.1	วัสดุและหัวกวน	39
3.3.2	การปั่นกวนโลหะผสมอลูมิเนียม	40
3.3.3	การวัดกระแสไฟฟ้า.....	41
3.3.4	การตรวจสอบโครงสร้าง.....	42
3.3.5	การทดสอบสมบัติทางกล.....	43
3.4	ผลการทดลอง	44
3.4.1	กระแสไฟฟ้าและพลังงาน	44
3.4.2	ขนาดของบ่อกวน	49
3.4.3	ขนาดเกรน.....	50
3.4.4	สมบัติเชิงกล.....	53
3.4.4.1	การทดสอบความแข็ง	53
3.4.4.2	การทดสอบแรงดึง.....	56
3.5	สรุปผลการวิจัย.....	60
3.6	รายการอ้างอิง.....	61
4	การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียม A6063-T831 กับ	
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (Friction Stir Spot Welding between Aluminum alloy	
	A6063-T831 and High Density Polyethylene)	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1	บทคัดย่อ	62
4.2	บทนำ	63
4.3	ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	63
4.3.1	วัสดุและหัวกวน	63
4.3.2	การเชื่อม	67
4.3.3	การตรวจสอบมหภาคชิ้นงานเชื่อม	69
4.3.4	การทดสอบความแข็งแรงดึง	69
4.4	ผลการทดลอง	70
4.4.1	รอยเชื่อม	70
4.4.2	ความแข็งแรงดึง	72
4.4.3	การตรวจสอบชิ้นงานแตกหัก	73
4.5	สรุปผลการวิจัย	76
4.6	รายการอ้างอิง	76
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	78
5.1	บทสรุป	78
5.2	ข้อเสนอแนะ	79
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก		
	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	80
ประวัติผู้เขียน		90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ปริมาณการใช้รถยนต์ไฟฟ้า	1
1.2 การนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบามาใช้ในรถยนต์	2
1.3 พฤติกรรมการต้านทานความล้าของกระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ	3
1.4 การโค้งงอของรอยเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม	3
1.5 การละลายของไฮโดรเจนในรอยเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม	3
1.6 รอยเชื่อมเสียดทานของ 6nylon/SPCC	5
1.7 รอยเชื่อมเสียดทานของ polyethylene/SPCC	6
1.8 สูตรโครงสร้างของ 6nylon/polyethylene	6
2.1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	12
2.2 หัวเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	14
2.3 บริเวณต่างๆของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน	15
2.4 ตำแหน่งของการฝังหลุม	16
2.5 ลักษณะการไหลของหลุมอลูมิเนียม	17
2.6 โครงสร้างอลูมิเนียมหล่อ ก่อนและหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	17
2.7 ขนาดของเกรนที่แตกต่างกันในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน a) 350 rpm, 152 mm/min และ b) 400 rpm, 102 mm/min	18
2.8 ขนาดเกรน ณ บริเวณต่างๆของรอยเชื่อม	19
2.9 การกระจายตัวค่าความแข็งของภาคตัดขวางรอยเชื่อมในทิศทางความหนา บริเวณด้านบนรอยเชื่อม กลางรอยเชื่อม และด้านล่างรอยเชื่อม	20
2.10 แสดงขนาดและการกระจายตัวของตะกอนของแข็ง (precipitate) ในแต่ละบริเวณ ของรอยเชื่อม	20
2.11 ลักษณะของรอยเชื่อมที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนและความเร็ว ในการเคลื่อนที่	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 การเชื่อมเสียดทานแบบจุด a) ลักษณะของหัวกวน b) การวางชิ้นงานและการเชื่อม c) ชิ้นงานหลังการเชื่อม	22
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการเชื่อมกับจำนวนครั้งในการกดหัวกวนลงชิ้นงาน	23
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งในการกดหัวกวนลงบนชิ้นงานกับความแข็งแรงดึง	24
2.15 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	25
2.16 ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่ส่งผลต่อ พลังงานที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน	26
2.17 ความเร็วในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ต่อสัดส่วนของพลังงานที่ เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อม	27
2.18 รูปทรงต่างๆของหมุดที่ใช้ในการทดสอบยึดวัสดุแผ่นต่างชนิดกัน	28
2.19 การยึดด้วยหมุดระหว่างโลหะกับพอลิเมอร์	28
2.20 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีต่อรอยเชื่อม	29
2.21 การทดสอบเพิ่มแรงกดในแนวแกนจาก 4 กิโลนิวตัน จนถึง 10.9 กิโลนิวตัน	30
2.22 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน a) ความเร็วรอบ 300 rpm b) ความเร็วรอบ 550 rpm c) ความเร็วรอบ 800 rpm	30
2.23 ลักษณะรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	31
2.24 ความแข็งแรงของรอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมที่แตกต่างกัน	32
2.25 เงื่อนไขในการเชื่อมของพลาสติกชนิดต่างๆ	32
2.26 ภาพตัดขวางของรอยเชื่อม HDPE, PA6, PVC ที่เงื่อนไขการเชื่อมต่างกัน	33
2.27 ความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมและสัดส่วนของความแข็งแรงที่ลดลง	34
2.28 กลไกการยึดเกี่ยวเชิงกล (mechanical interlocking) ในการเชื่อม	34
2.29 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน AI-HDPE ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	35
2.30 บริเวณที่เกิดการแตกหักของรอยเชื่อม FSW ระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ลักษณะของหัวกวนที่ใช้กวน	39
3.2 กระบวนการกวนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	41
3.3 การจับยึดชิ้นงานก่อนทำการกวน	41
3.4 การตรวจวัดกระแสในขณะทำการกวน	42
3.5 บริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้าง	42
3.6 บริเวณที่ทดสอบความแข็งและความแข็งแรงดึง	43
3.7 ชิ้นงานทดสอบความแข็งเฉพาะบริเวณ	43
3.8 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง	44
3.9 ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อม กรณีการเชื่อมด้วย $\omega = 1120 \text{ rpm}$, $V = 56 \text{ mm/min}$	46
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการหมุนกับพลังงาน	46
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการกวนกับพลังงาน	47
3.12 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวน/ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนกับพลังงาน	48
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ลงสู่รอยกวนกับขนาดบ่อกวน	49
3.14 ขนาดเกรน ณ บริเวณต่างๆ ในบ่อกวนเปรียบเทียบกับพลังงาน	51
3.15 ขนาดเกรนบริเวณนอกบ่อกวนกับพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง	52
3.16 ขนาดเกรนบริเวณต่างๆ ของรอยกวนจากสถานะการกวน โดยใช้ความเร็วในการหมุนของหัวกวน $\omega = 710 \text{ rpm}$ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน $V = 28, 56, 112 \text{ mm/min}$	53
3.17 การกระจายตัวของค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีการกวนด้วยความเร็วรอบในการหมุน 1120 rpm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 56 mm/min	54
3.18 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางกับความแข็ง	56
3.19 ความสัมพันธ์ของพลังงานกับความเค้นจุดคราก	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 ความสัมพันธ์ของพลังงานกับความแข็งแรงดึง	58
3.21 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง	58
3.22 รอยแตกหักของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการกวน	59
3.23 รอยแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการกวน	59
3.24 ภาพถ่าย SEM A) พื้นผิวรอยแตกของโลหะผสมอลูมิเนียมเริ่มต้น B) พื้นผิวรอยแตกของ ชิ้นงานเชื่อม	60
4.1 ขนาดของชิ้นงาน โลหะผสมอลูมิเนียมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้ในการศึกษา ..	64
4.2 ลักษณะของชิ้นงานภายหลังกลึงไส	65
4.3 การเตรียมผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องกลึงผิวโลหะ	65
4.4 ชิ้นงานก่อนการเชื่อมในลักษณะต่อชน ณ คู่ความหนาหน้าสัมผัสที่แตกต่างกัน	66
4.5 ลักษณะของหัวกวนที่ใช้เชื่อม	66
4.6 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในขั้นที่หนึ่ง	67
4.7 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในขั้นที่สอง	68
4.8 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง	70
4.9 ชิ้นงานหลังการเชื่อมคู่ความหนาหน้าสัมผัสแตกต่างกัน ความเร็วรอบของ หัวกวนคงที่ 710 rpm	71
4.10 ชิ้นงานหลังการเชื่อมคู่ความหนาหน้าสัมผัสคงที่ ความเร็วรอบของหัวกวนแตกต่างกัน	71
4.11 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่คู่ความหนาหน้าสัมผัสแตกต่างกัน	72
4.12 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนแตกต่างกัน	73
4.13 ชิ้นงานหลังหลังจากการทดสอบความแข็งแรงดึง	74
4.14 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบความแข็งแรงดึงที่คู่ความหนา หน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อมแตกต่างกัน	74
4.15 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบความแข็งแรงดึงในกลุ่มที่ ควบคุมความหนาหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อม 3.2 มิลลิเมตร	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 งานวิจัยที่ศึกษาการเชื่อมโลหะกับพลาสติก	4
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอลูมิเนียม	40
4.1 สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม	64
4.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอลูมิเนียม	64
4.3 สภาพะที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในการศึกษาช่วงที่หนึ่ง	69
4.4 สภาพะที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในการศึกษาช่วงที่สอง	69



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ω	=	ความเร็วรอบของการหมุน
V	=	ความเร็วในการเคลื่อนที่
FSW	=	กระบวนการเชื่อมแบบเสียดทานหมุนกวน
HDPE	=	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง
rpm	=	รอบต่อนาที
mm/min	=	มิลลิเมตรต่อนาที
θ	=	มุมเอียงของหัวกวน
WNZ	=	บริเวณบ่อกวน
TMAZ	=	บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและแรงทางกล
HAZ	=	บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน
BM	=	เนื้อวัสดุพื้น
FSP	=	กระบวนการเชื่อมเสียดทานปรับปรุงสมบัติ
DRX	=	การตกผลึกใหม่ของเกรนอย่างต่อเนื่อง
FSSW	=	การเชื่อมเสียดทานแบบจุด
M	=	แรงบิด
$P_{\text{wall plug}}$	=	พลังงานไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้กับเครื่องจักร
P_{sby}	=	พลังงานไฟฟ้าสแตนด์บาย
P_{idle}	=	พลังงานที่ยังไม่ได้ใช้งาน
P_{loss}	=	พลังงานไฟฟ้าบางส่วนที่สูญเสียไปกับระบบ
P_{process}	=	พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม
H13	=	เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน
E_1	=	พลังงานขาเข้า
$E_{\text{workpiece}}$	=	พลังงานที่ส่งสู่ชิ้นงานเชื่อม
E_{ground}	=	พลังงานที่เครื่อง milling ใช้ขั้นต่ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

E_{lose}	=	พลังงานที่สูญเสียไป
$E_{@1m}$	=	พลังงานเชื่อมในระยะทาง 1 เมตร
$t_{@1m}$	=	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ 1 เมตร
t_{total}	=	เวลาทั้งหมด
ΔI	=	ผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมสองกรณี
V	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้า
q_m	=	ฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อมลงสู่ชิ้นงานเชื่อม
μ	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
P	=	แรงกดของหัวกวน
$R_{shoulder}$	=	รัศมีป้าของหัวกวน
R_{probe}	=	รัศมีหัวกวน
H_{probe}	=	ความสูงของหัวกวน
A_{tool}	=	ลักษณะของหัวกวน



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดีไม่ได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำทั้งในด้านวิชาการ ปฏิบัติการ การดำเนินงานวิจัยอย่างดียิ่งจากบุคคลและกลุ่มบุคคลและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงอันได้แก่

ผศ.ดร.รัตน บริสุททธิกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งได้เสียสละเวลาอบรมสั่งสอนผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาและยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.ปัญญา บัวสมบุรา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งได้เสียสละเวลาอบรมสั่งสอนผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาและยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญหาในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องทุกท่านที่อาจ ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขอมอบให้ กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งและสงเสียดให้ ได้มีการศึกษาจนถึงทุกวันนี้ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

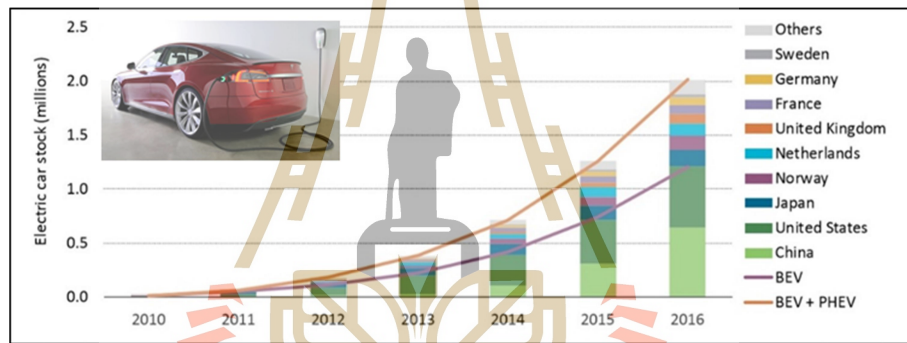
ธวัชชัย อินทร์เที่ยง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

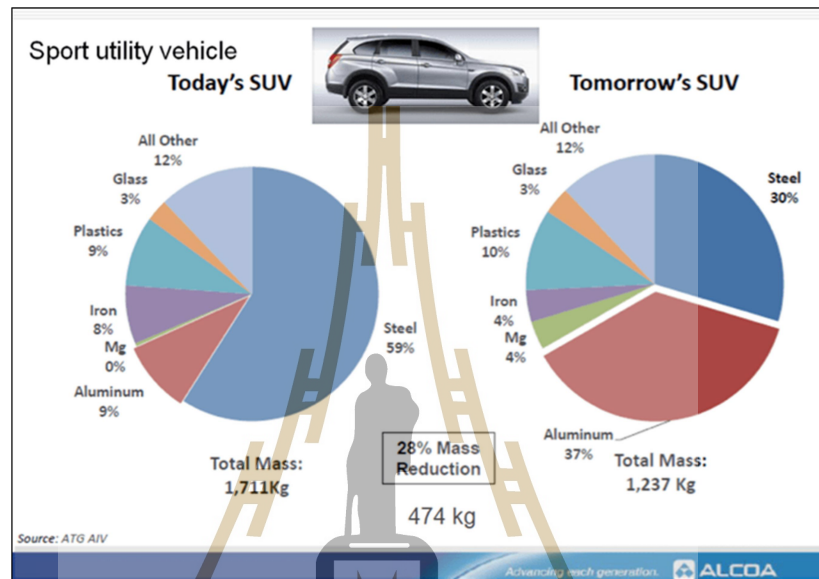
รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มใช้เป็นยานพาหนะในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาและมีแนวโน้มใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 1.1 เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางเสียงดูแลรักษาง่ายและสะดวก



รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้รถยนต์ไฟฟ้า [1]

อย่างไรก็ดีเทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้ายังมีความจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงและพัฒนาอีกมากด้วยรถยนต์ไฟฟ้ายังมีปัญหาการใช้เวลาในการชาร์จนาน และระยะทางในการขับขี่จำกัด เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว รถยนต์ไฟฟ้าจึงควรใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการชาร์จไฟฟ้าหนึ่งครั้ง วิธีการหนึ่งที่สำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าคือ การลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาความแข็งแรงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้าในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.2 จากรูปที่ 1.2 พบว่าเมื่อนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อลูมิเนียม และพลาสติก เข้าไปใช้ทดแทนชิ้นส่วนวัสดุเดิมที่มีน้ำหนักมาก เช่น เหล็กกล้า เหล็กหล่อ เป็นต้น พบว่าสามารถลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ได้ถึง 28 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ 474 กิโลกรัม

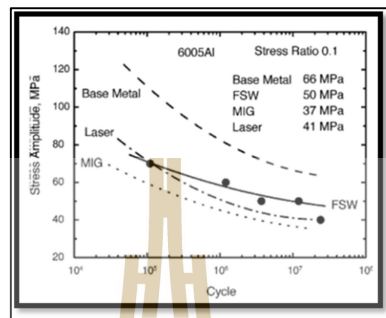
เมื่อมีการนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบามาใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีบางชิ้นส่วนที่จำเป็นต้องการการเชื่อมต่อ กระบวนการเชื่อมจึงเป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้ทั้งในการเชื่อมโลหะที่มีน้ำหนักเบา กับ โลหะที่มีน้ำหนักเบา หรือเชื่อมโลหะที่มีน้ำหนักเบา กับ พลาสติก



รูปที่ 1.2 การนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบามาใช้ในรถยนต์ [2]

เป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการเชื่อม เหล็กกล้า สแตนเลส ฯลฯ ในปัจจุบันที่นิยมใช้คือ การเชื่อมแบบหลอมผสม ซึ่งได้แก่การเชื่อมอาร์คสวดหุ้มฟลักซ์ (shielded metal arc welding: SMAW) การเชื่อมต้านทาน (resistance welding) การเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (gas tungsten arc welding: GTAW) และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ (laser welding) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดีกระบวนการเชื่อมในลักษณะข้างต้นเมื่อนำมาใช้เชื่อมโลหะข้างต้นยังมักให้สมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุเริ่มต้น (base metal) ชิ้นงานหลังการเชื่อมมีการบิดเบี้ยวสูง [1] ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และ 1.4 มีบริเวณกระทบร้อนขนาดใหญ่ เกิดการแยกตัวของธาตุผสมในบ่อหลอม รอยเชื่อมมีความคืบขึ้นสูง เกรนเกิดการขยายตัว ยิ่งไปกว่านั้นกระบวนการเชื่อมเหล่านี้ยังไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในการเชื่อมวัสดุในกลุ่มที่มีน้ำหนักเบา อย่างเช่น แมกนีเซียม หรือ อลูมิเนียม โดยเฉพาะอลูมิเนียม เนื่องจากในระหว่างการเชื่อมเมื่อโลหะอลูมิเนียมเกิดการหลอมละลายแก๊สไฮโดรเจนมีความสามารถในการละลายเข้าไปในรอยเชื่อมสูงขึ้น [3] ซึ่งส่งผลให้เกิดรูพรุน โพรงอากาศ ในเนื้อ

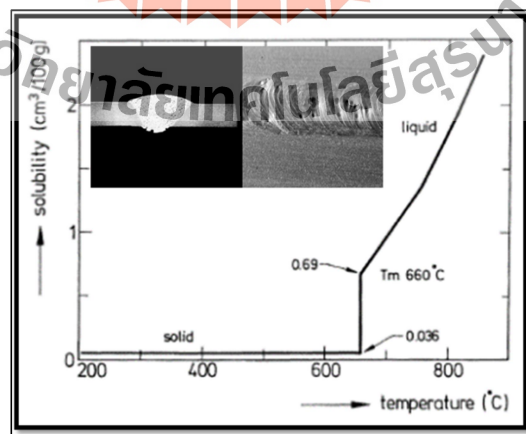
วัสดุโลหะผสมอลูมิเนียมหลังการเชื่อมเป็นเหตุให้รอยเชื่อมมีคุณสมบัติทางกลลดลง ดังแสดงในรูปที่ 1.5 อีกทั้งเมื่อเกิดการลอมละลายส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมเป็นผลให้สูญเสียความแข็งแรง



รูปที่ 1.3 พฤติกรรมการต้านทานความล้าของกระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ [3]



รูปที่ 1.4 การโค้งงอของรอยเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม [3]



รูปที่ 1.5 การละลายของไฮโดรเจนในรอยเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม [5]

ดังนั้นกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดซึ่งเป็นการเชื่อมวัสดุในสภาวะของแข็งจึงถูกนำมาใช้ในการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม เพื่อช่วยลดปัญหาที่พบในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย โดยให้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรง ชื่นงาน บิดเบี้ยวน้อย และยังสามารถปรับปรุงขนาดของเกรน เป็นผลให้สมบัติเชิงกลบริเวณบ่อกวนสูงกว่าวัสดุพื้น

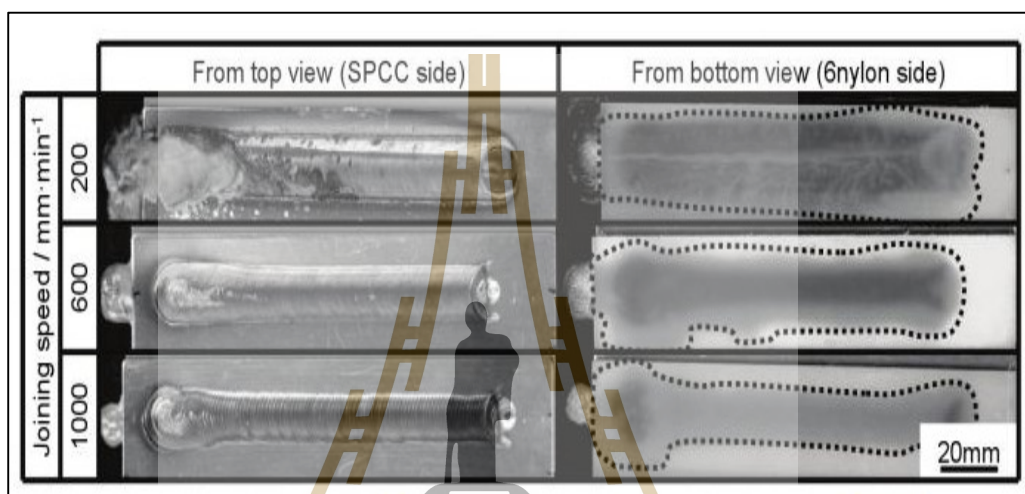
กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้มีตัวแปรหลักที่ใช้ในการควบคุมอยู่ 3 ตัวแปร คือ ความเร็วรอบของการหมุน (rotating speed : ω) และความเร็วในการเคลื่อนที่ (traveling speed : V) ของหัวกวน รวมถึงมุมเอียงของหัวกวน (tilt angle) ได้มีนักวิจัยที่ทำการศึกษาศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในลักษณะที่คล้ายกันเช่นงานของ Dubourg et al., Mahoney et al., Takehiko Watanabe et al., Karthikeyan et al. [6,7,8,9] โดยใช้ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วรอบของการหมุนหัวกวน และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรข้างต้นต่อลักษณะของบ่อกวน ขนาดของเกรน รวมไปถึงความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมและจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งตัวแปรข้างต้นนั้นเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักร ไม่ใช่ตัวแปรทางวิทยาศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางโลหะวิทยาในเนื้อของวัสดุ และยังมีกลุ่มนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษาถึงพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานในระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเช่น Chase D. Cox et al., WoongJo Choi et al., [10,11] ถึงแม้ว่าจะสามารถคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมได้ แต่ก็ไม่ได้นำพลังงานที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาจึงทำให้การศึกษาศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงยังขาดความลุ่มลึก

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนและการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดยังมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดและวัสดุต่างชนิด เช่นระหว่างพอลิเมอร์และโลหะ [12,13] ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่ศึกษาศึกษาการเชื่อมโลหะกับพลาสติก

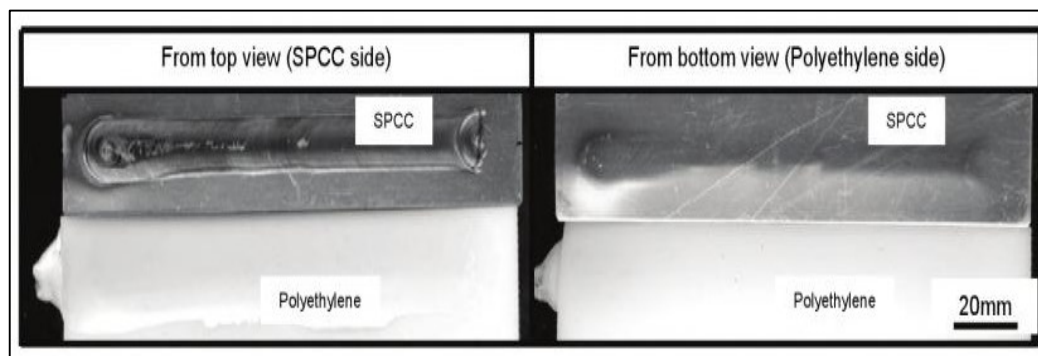
ผู้วิจัย	กระบวนการเชื่อม	วัสดุ	ศึกษา
D kitagawa, K Nagatsuka, K Nakata. 2013	Friction lab welding	SPCC & 6nylon, SPCC & polyethylene	ผลของ ω และ v ต่อการยึดติดของเหล็กแผ่นรีดขึ้นกับไนลอนและเหล็กแผ่นรีดขึ้นกับพอลิเอทิลีน
F.C. Liu, J. Liao, K. Nakat. 2014	Friction lab welding	AA6061-T6 & 6nylon	ความเป็นไปได้ในการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับไนลอน ที่สภาวะ ω และ v แตกต่างกัน

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้มีความพยายามเชื่อมโลหะกับพลาสติกด้วยวิธีการให้ความร้อนจากการเสียดสีเช่น D. Kitagawa et al. [12] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันระหว่างพลาสติก (6nylon, polyethylene) กับเหล็กแผ่นรีดเย็น (SPCC) โดยวิธีการเชื่อมเสียดทานในลักษณะซ้อนเกย (friction lap joining, FLJ) เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการยึดติดของพลาสติกและเหล็กกล้าคาร์บอน



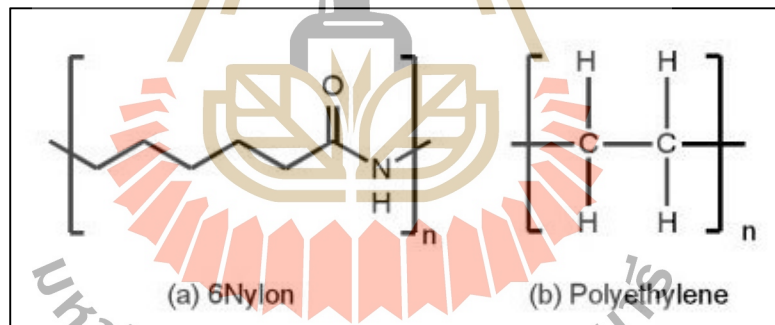
รูปที่ 1.6 รอยเชื่อมเสียดทานของ 6nylon/SPCC [12]

พบว่า 6nylon สามารถเชื่อมติดกับ SPCC ได้ในช่วงความเร็วรอบในการหมุนของหัวควน 1000 rpm และความเร็วในการเดินหัวเชื่อมตั้งแต่ 200-1000 mm/min อย่างไรก็ตามที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมต่ำพบฟองก๊าซเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานเนื่องจากความร้อนที่ผิวชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของ 6nylon ดังแสดงในรูป 1.6 แต่ในการเชื่อม polyethylene กับ SPCC ไม่สามารถทำให้วัสดุทั้งสองชนิดเชื่อมติดกันได้ในทุกเงื่อนไขดังแสดงในรูป 1.7 ซึ่งผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ F.C. Liu, J. Liao, K. Nakat. [13] ศึกษาการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด 6061-T6 กับ ไนลอน โดยใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานชิ้นงานถูกเชื่อมในลักษณะซ้อนเกย จากการศึกษพบว่าชิ้นงานหลังการเชื่อมระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับไนลอนไม่เกิดการเชื่อมติดกัน



รูปที่ 1.7 รอยเชื่อมเสียดทานของ polyethylene/SPCC [12]

ผลการวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเชื่อมระหว่างโลหะกับพลาสติก หรือการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพลาสติกที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันทำได้ยากเนื่องจากชิ้นงานเชื่อมไม่เกิดปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน ด้วยเหตุนี้การเชื่อมด้วยกลไกการยึดติดทางกลจึงมีความเป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดการยึดติดกัน



รูปที่ 1.8 สูตร โครงสร้างของ 6nylon/polyethylene [12]

จากที่กล่าวมาในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโลหะผสมอลูมิเนียมอาศัยกลไกการเชื่อมติดในสถานะของแข็งซึ่งพลังงานความร้อนที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ชิ้นงานเชื่อมที่แข็งแรง แต่จากการศึกษางานวิจัยพบว่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโลหะผสมอลูมิเนียมส่วนใหญ่เป็นตัวแปรของเครื่องจักร ไม่ใช่ตัวแปรทางวิทยาศาสตร์ เช่น พลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในเนื้อของวัสดุซึ่งความรู้ความเข้าใจต่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมมีความสำคัญอย่างยิ่ง และในการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพลาสติกที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันเป็น

การเชื่อมที่ยากจำเป็นต้องอาศัยกลไกเฉพาะการยึดเกี่ยวกันของเนื้อวัสดุซึ่งยังขาดความรู้ความเข้าใจ พฤติกรรมของกลไกการยึดเกี่ยวกันของเนื้อวัสดุด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงเกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมซึ่งสัมพันธ์กับสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของรอยเชื่อม รวมถึงสร้างความเข้าใจกลไกการเชื่อมตึกระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1) พลังงานความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมในปริมาณที่แตกต่างกันน่าจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้เฟสไปย้อมส่งผลต่อกลไกการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม การเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนขนาดของบ่อกวนที่แตกต่างกัน และด้วยการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกันส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังการเชื่อมแตกต่างกัน

2) กลไกการเชื่อมตึกระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความแตกต่างกันด้วยเหตุนี้พฤติกรรมของตัวแปรงานเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลน่าจะแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1) ในการศึกษาการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการกวนโลหะผสมอลูมิเนียม กระทำโดยใช้ชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมแผ่นเกรด 6063-T831 ความหนา 6.4 มิลลิเมตรเท่านั้น สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรงานเชื่อมกับพลังงานความร้อนลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง กระทำโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่ 450, 710 และ 1120 รอบต่อนาที และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่ 28, 56 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่านั้น โดยศึกษาพลังงานความร้อนลงสู่ชิ้นงานที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติรอยเชื่อม ขนาดของบ่อกวน และขนาดของเกรนเท่านั้น

2) ในการศึกษาการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ใช้ชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมแผ่นเกรด 6063-T831 ความหนา 6.4 มิลลิเมตรกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงแผ่นหนา 6.4 มิลลิเมตรโดยลักษณะการจัดวางชิ้นงานเชื่อมเป็นแบบต่อชนเท่านั้น สำหรับ

การศึกษาพฤติกรรมกลไกการเชื่อมตึกระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งสัมพันธ์กับตัวแปรงานเชื่อม กระทำโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่ 500, 710 และ 1000 รอบต่อนาที และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่ 28, 56 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่านั้น โดยมุ่งศึกษาตัวแปรงานเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรงานเชื่อมกับพลังงานความร้อนลงสู่ชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมแผ่นเกรด 6063-T831 และผลของพลังงานความร้อนลงสู่ชิ้นงานต่อสมบัติของโลหะผสมอลูมิเนียมที่เปลี่ยนไป
- 2) เข้าใจพฤติกรรมของกลไกการเชื่อมตึกระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งสัมพันธ์กับตัวแปรงานเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

1.6 รายการอ้างอิง

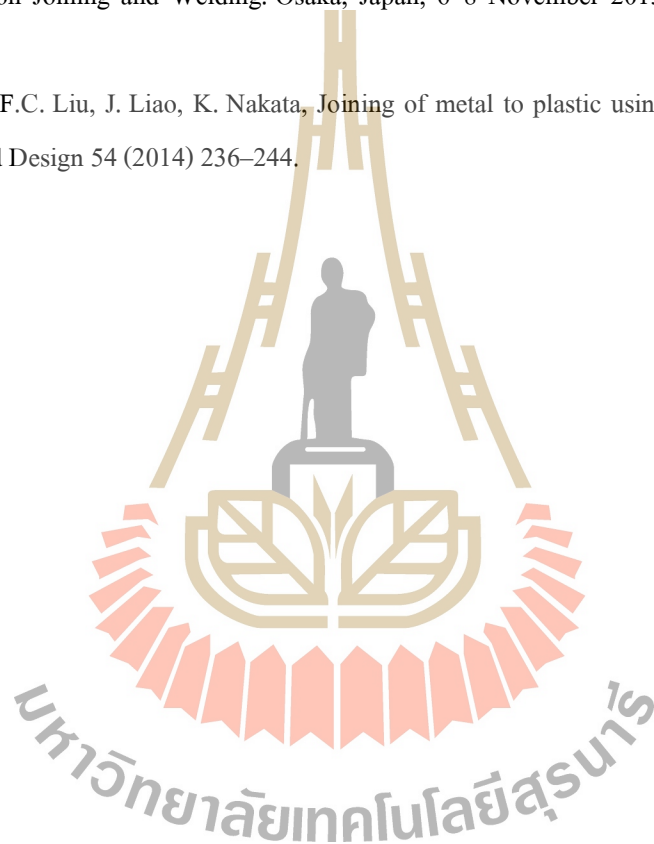
- [1] <http://www.greencarcongress.com/2017/06/20170607-iea.html>
- [2] <http://auto.gasgoo.com/News/2017/07/11065517551770017682C407.shtml>
- [3] H. Hori, S. Makita, H. Hino, in: Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999.
- [4] <http://www.hitachi-power-solutions.com/products/product09/p043.html>
- [5] T. Lujendijk, Journal of Materials Processing Technology 103 (2000) 29±35
- [6] Dubourg, et al. 6th Int. FSW Symp., St Sauveur, Canada, 2006.
- [7] M. Mahoney, R.S. Mishra, T. Nelson, J. Phintoff, R. Islamgaliev, Y. Hovansky, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S.Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Field (Eds.), Friction Stir Welding and Processing, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001, p.183.
- [8] Takehiko Watanabe, Hirofumi Takayama, Atsushi Yanagisawa, Journal of Materials Processing Technology 178 (2006) 342–349.
- [9] Karthikeyan R, Balasubramanian V. Predictions of the optimized friction stir spotwelding process parameters for joining AA2024 aluminum alloy using RSM. IntJ Adv Manuf Technol 2010;51:173–83.

[10] Chase D. Cox, Brian T. Gibson, Alvin M. Strauss, George E. Cook, Energy input during friction stir spot welding, *Journal of Manufacturing Processes* 16 (2014) 479–484.

[11] WoongJo Choi, Justin D. Morrow, Frank E. Pfefferkorn, Michael R. Zinn, The effects of welding parameters and backing plate diffusivity on energy consumption in friction stir welding, *Procedia Manufacturing* 10 (2017) 382 – 391.

[12] D Kitagawa, K Nagatsuka, K Nakata. Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding. Osaka, Japan, 6–8 November 2013. ISBN: 978-1-78242-163-4.

[13] F.C. Liu, J. Liao, K. Nakata, Joining of metal to plastic using friction lap welding, *Materials and Design* 54 (2014) 236–244.



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การเชื่อม (Welding) เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการยึดติดหรือเชื่อมต่อวัสดุส่วนใหญ่ เป็นแล้วใช้กับวัสดุประเภทโลหะและเทอร์โมพลาสติก โดยทำให้เนื้อวัสดุเกิดการรวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลาย และการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในบ่อหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง ใช้แรงดันร่วมกับความร้อน หรืออย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อให้เกิดรอยเชื่อม [1] ประวัติการเชื่อมนั้นเริ่มจากการตีเหล็กให้ติดกันเกิดขึ้นมานานกว่า 3000 ปี การเชื่อมด้วยวิธีนี้แต่ก่อนนั้นยังเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสำหรับชาวโบราณ ต่อมาในศตวรรษที่ 18 เริ่มยุคอุตสาหกรรม การเชื่อมต่อชิ้นส่วนของวัสดุมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างเครื่องจักร หม้อน้ำ อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ซึ่งวิวัฒนาการของการเชื่อมก็เริ่มชัดเจนขึ้นโดยไล่เรียงการค้นพบ การพัฒนา และการนำไปใช้ดังนี้

ค.ศ. 1809 เดวี นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ค้นพบการอาร์กไฟฟ้า

ค.ศ. 1867 อีลิท ฐอมเซน ค้นพบการเชื่อมความต้านทานสำหรับงานเหล็ก

ค.ศ. 1867 ชาวรัสเซีย วอน เบอร์นาโดส์ และออลชิวสกี ทดลองใช้การเชื่อมด้วยการอาร์กไฟฟ้า การอาร์กระหว่างแท่งอิเล็กโทรดคาร์บอนและชิ้นงาน

ค.ศ. 1890 ชาวรัสเซีย สลาเวียโนฟ พัฒนาการเชื่อมอาร์กไฟฟ้าแบบลวดเชื่อมลื่นเปลือง

ค.ศ. 1893 ค้นพบแก๊สอะเซทิลีน

ค.ศ. 1895 พัฒนาการเชื่อมแก๊สอะเซทิลีนและอากาศ โดย คาร์ลวอน ลินเด

ค.ศ. 1896 แดรกเกอร์ คิดค้นหัวทอร์ชเชื่อม แบบการดูด (suction) และ

หัวฉีดพ่น (injector nozzle)

ค.ศ. 1901 เป็นครั้งแรกที่ใช้อะซิโตนละลายอะเซทิลีน

ค.ศ. 1908 คจิลเบิร์ก ใช้ลวดเชื่อมในการเชื่อมซ่อม เป็นครั้งแรก

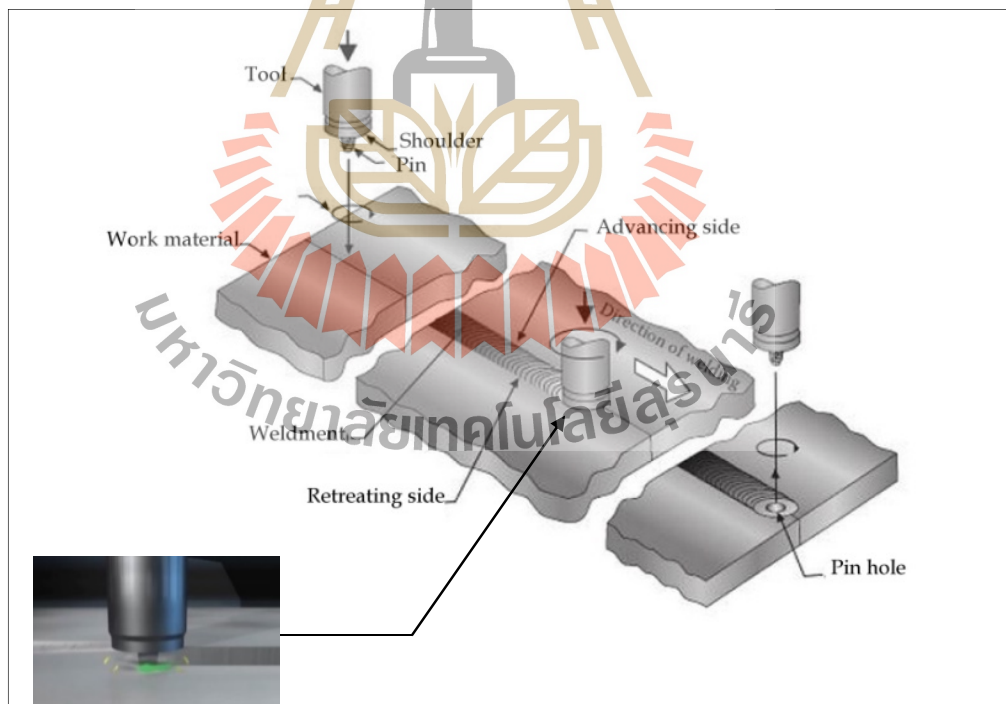
- ค.ศ. 1937 ในเยอรมันได้ใช้การเชื่อมใต้ฟลักซ์ (submerged-arc welding)
- ค.ศ. 1940 เริ่มต้นการเชื่อมทิก (tungsten inert gas welding - TIG) ในอเมริกาด้วยแก๊สฮีเลียม
- ค.ศ. 1950 การใช้การเชื่อมด้วยแก๊สเฉื่อย ในสหพันธรัฐเยอรมัน ด้วยแก๊สอาร์กอน
- ค.ศ. 1955 การเชื่อมด้วยแก๊สปกป้องด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- ค.ศ. 1955 การเริ่มต้นทดลองใช้การเชื่อมแบบอิเล็กโตร-สแล็ก (electro slag) ในรัสเซียและจดลิขสิทธิ์การเชื่อมพอกผิวด้วยลาวาเชื่อม
- ค.ศ. 1957 การพัฒนากรรมวิธีการเชื่อมแบบอิเล็กโตร-สแล็ก (electro slag)
- ค.ศ. 1957 การประยุกต์ใช้การตัดด้วยอาร์กพลาสมา
- ค.ศ. 1961 มีการจดลิขสิทธิ์การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (electron-beam)
- ค.ศ. 1965 การพัฒนาการเชื่อมแบบลาวาเชื่อมแกนฟลักซ์ (flux-cored wire) ในรัสเซีย
- ค.ศ. 1965 โรเบิร์ต โชรอฟ และ เซมัวร์ ลินเช่ ได้จดลิขสิทธิ์การเชื่อมโดยอาศัยการสั่นที่ความถี่สูงของหัวเชื่อม (ultrasonic welding)
- ค.ศ. 1968 การพัฒนาของเลเซอร์แก๊สและของเหลว
- ค.ศ. 1991 สถาบันวิจัยเทคโนโลยีของอังกฤษ ค้นพบการเชื่อมวัสดุในสภาวะของแข็ง หรือที่เรียกกันว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- จะพบว่า การเชื่อมมีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องก็เพื่อเพิ่มความสามารถในการเชื่อมวัสดุที่สูงขึ้นและลดข้อจำกัดของการเชื่อมให้น้อยลง อีกทั้งกระบวนการเชื่อมบางประเภทยังสามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดได้ กระบวนการเชื่อมบางประเภทเหมาะกับการเชื่อมวัสดุในกลุ่มที่มีน้ำหนักเบา เนื่องจากให้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรง เช่น กระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง

2.2 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding)

การเชื่อมวัสดุด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (friction stir welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้คิดค้นโดย TWI (The Welding Institute) ของอังกฤษในปี ค.ศ.1991 [2] ซึ่งการเชื่อมแบบนี้เป็นกระบวนการเชื่อมที่เกิดขึ้นมาไม่นาน โดยได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานการผลิตในอุตสาหกรรมอากาศยานและอวกาศยาน อุตสาหกรรมการต่อเรือ และยานยนต์ทางการทหาร รวมถึงอุตสาหกรรมการประกอบต่างๆที่มีการใช้โลหะผสมอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ ในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมวิธีนี้กำลังเป็นที่แพร่หลายในกลุ่มอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อดีด้านต่างๆที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการแบบเดิมคือการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม และการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมทำให้การเชื่อมด้วยกระบวนการเสียดทานกวนมีความ

น่าสนใจในการที่จะนำ มาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยานยนต์หรืออุตสาหกรรมอื่น และในปัจจุบันมีแนวโน้มว่าจะมีการใช้มากขึ้นเนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและยังเป็นกระบวนการเชื่อมประกอบแบบอัตโนมัติที่สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรอัตโนมัติที่มีใช้อยู่ทั่วไปได้ซึ่งจะส่งผลให้ในกระบวนการผลิตชิ้นงานหลังการเชื่อมมีสมบัติใกล้เคียงกันทุกชิ้น

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (friction stir welding, FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (solid state welding) โดยหัวกวน (tool) จะทำหน้าที่ให้ความร้อนและกวนเนื้อวัสดุให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันในแนวรอยเชื่อม ซึ่งหัวกวนประกอบไปด้วยตัวกวน (pin) เป็นส่วนที่จุ่มลงไปเนื้อของวัสดุหน้าที่หลักคือการกวนเนื้อบริเวณแนวเชื่อมให้ผสมกัน และบ่า (shoulder) เมื่อสัมผัสกับผิวของแนวรอยเชื่อมส่งผลให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่า (shoulder) กับเนื้อวัสดุรอบๆทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสถานะคล้ายของไหล (plastic fluid-like state) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่า (shoulder) วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวน (pin) จะถูกกดขยอนลงมาเนื่องจากการกดของบ่า (shoulder) ทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [3]

2.2.1 ตัวแปรในการเชื่อม

ในการเชื่อมแบบเสียดทานกวน (Friction stir welding, FSW) จะมีตัวแปรที่สำคัญอยู่ดังนี้คือ

1. ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือเชื่อม (tool rotation speed (ω), rpm) จะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ ความเร็วรอบที่สูงทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงในแนวเชื่อม และส่งผลต่อการกวนผสมของเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน (pin) และการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุจากทางด้านหน้ารอยเชื่อมมาด้านหลังของแนวเชื่อมเพื่อปิดรอยเดินของแกนหมุน ให้ได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์

2. ความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวเชื่อม (tool travelling speed (v), mm/min) ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายวัสดุจากด้านหน้าของตัวกวน ไปสู่ด้านหลังและทำให้เกิดแนวเชื่อมที่สมบูรณ์

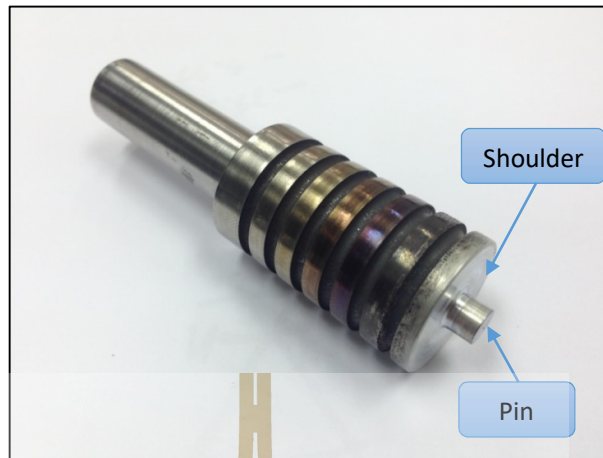
3. มุมเอียงของหัวกวน (Tilt angle : θ) ความเอียงของตัวกวนที่ทำมุมกับแกนตั้งฉากของเครื่องกัดที่มีค่าเหมาะสมทำให้บ่า (shoulder) ด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมสร้างแรงกด ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแน่นมากขึ้น เพื่อลดจุดบกพร่อง tunnel defect ที่อาจเกิดขึ้นได้

4. รูปทรงของ tool สามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนดังแสดงในรูป 2.2

4.1 ส่วนปลายหรือหัวกวน (pin) เป็นส่วนที่จะถูกกดลงไปเนื้อวัสดุที่จะทำการเชื่อมหน้าที่หลักคือการทำให้เนื้อวัสดุเกิดการหมุนวนไปรอบๆ บริเวณหัวกวน (pin) และทำให้เกิดการประสานกันของวัสดุที่มาเชื่อมกันอาจจะเป็นชนิดเดียวหรือต่างชนิด

4.2 ส่วนบ่าของหัวเชื่อม (shoulder) เป็นส่วนที่อยู่สูงขึ้นมาจากหัวกวน (pin) ซึ่งเมื่อทำการเชื่อมบ่าจะต้องไปสัมผัสกับผิวของชิ้นงานเชื่อมทำให้เกิดการเสียดสี (friction) ส่งผลให้เกิดความร้อนแก่วัสดุทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและแสดงสภาวะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเกิดการหมุนวนไปบริเวณรอบๆ หัวกวน (pin) อีกทั้งบ่า (shoulder) ยังทำหน้าที่สร้างแรงกดให้กับรอยเชื่อมบริเวณด้านหลังแนวการเชื่อมที่เป็นผลมาจากการเอียงมุม (tilt angle)

4.3 ก้านจับยึดกับเครื่องกัดแนวราบ (welding tool) เป็นส่วนถูกจับยึดจากเครื่องกัดแนวราบเพื่อส่งแรงจากตัวเครื่องมือมายังชิ้นงานที่ทำการเชื่อม



รูปที่ 2.2 หัวเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

2.2.2 ลักษณะที่เกิดขึ้นบริเวณต่างๆของรอยเชื่อมด้วยวิธีการ FSW

ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะได้อรอยเชื่อมที่มีลักษณะแตกต่างกันสี่บริเวณ แบ่งตามลักษณะโครงสร้าง [4,5] ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.3

1. Weld nugget zone (WNZ) เป็นบริเวณที่เกิดการตกผลึกใหม่ (recrystallization) อันเนื่องมาจากการกวนของหัวเชื่อมด้วยแรงทางกลและได้รับผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction Heat) อันเนื่องมาจากบ่า (shoulder) ที่เสียดสีกับผิวชิ้นงานเกิดเป็นความร้อนถ่ายเทไปสู่บ่อรอยเชื่อมทำให้เกิดลักษณะ โครงสร้างจุลภาคหรือเกรนที่มีขนาดเล็กละเอียด

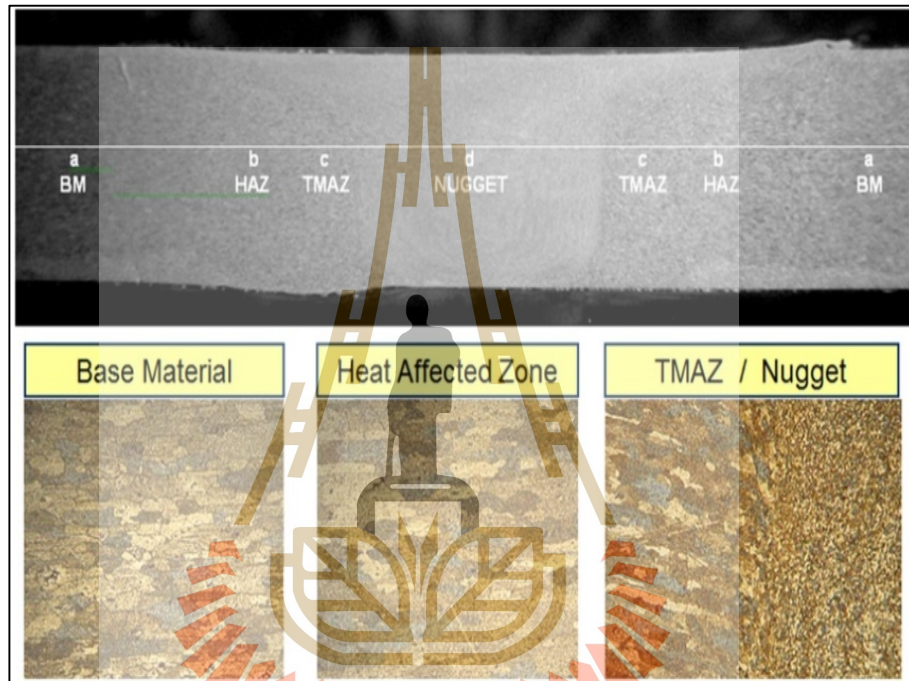
2. Thermo-mechanically affected zone (TMAZ) เป็นบริเวณที่โครงสร้างจุลภาคเกิดการเสียรูป อันเนื่องมาจากการกวนของหัวเชื่อมและได้รับผลกระทบจากความร้อนในปริมาณที่ไม่สูงมากเนื่องจากบริเวณ (TMAZ) อยู่ห่างออกมาจากหัวกวนระยะหนึ่ง โดยที่ไม่เกิดการตกผลึกใหม่เหมือนในบริเวณ (WNZ) ส่งผลให้ในบริเวณนี้จะพบการยึดของเกรนตามทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุ

3. Heat-affected zone (HAZ) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากแรงทางกลของหัวกวน แต่ได้รับผลจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของบ่า ส่งผลให้เกิดการโตของเกรน (grain growth) เกิดขึ้นในบริเวณนี้ และเกิดการละลายหรือตกตะกอนของแข็ง

4. Base or Parent material (BM) เป็นบริเวณเนื้อวัสดุที่ไม่ได้รับผลกระทบทั้งจากความร้อนและแรงทางกลจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาค

Retreating Side หมายถึง ชิ้นงานทดสอบด้านที่ถูกกวนให้เนื้อออกไปด้านหลัง ในการเชื่อมแบบ FSW จะกำหนดให้หัวกดเชื่อมหมุนตาม เข็มนาฬิกา (clockwise) จากจุดเริ่มต้น เทียบกับทิศทางการเชื่อม โดยให้ด้าน retreating อยู่ด้านขวามือ

Advancing Side หมายถึง ชิ้นงานทดสอบด้านที่ถูกกวนให้เนื้อวัสดุเคลื่อนไปด้านหน้า advancing จะอยู่ทางด้านซ้ายของรอยเชื่อมหรืออยู่ด้านตรงกันข้ามกับด้าน (retreating) เสมอ

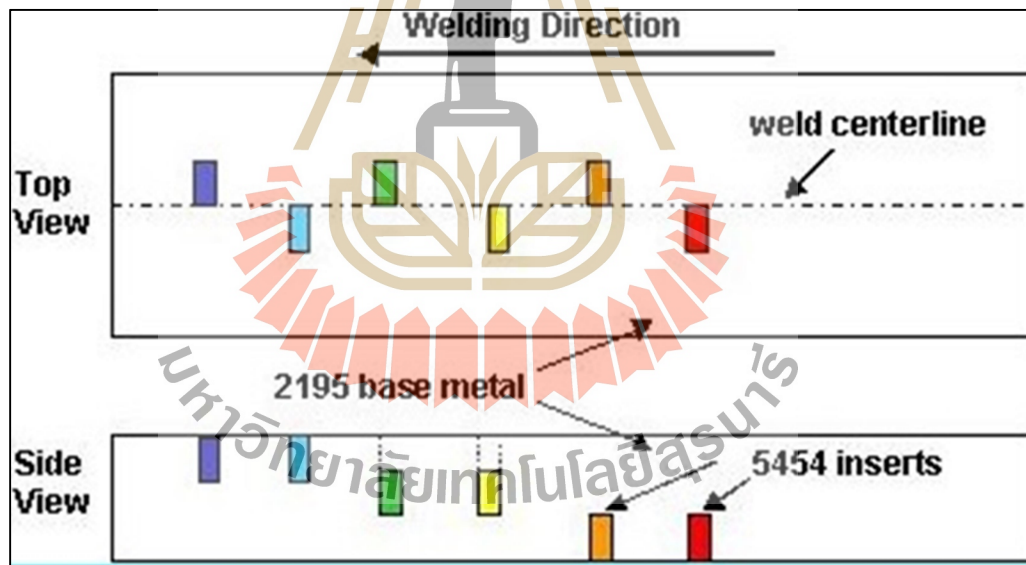


รูปที่ 2.3 บริเวณต่างๆของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน [6]

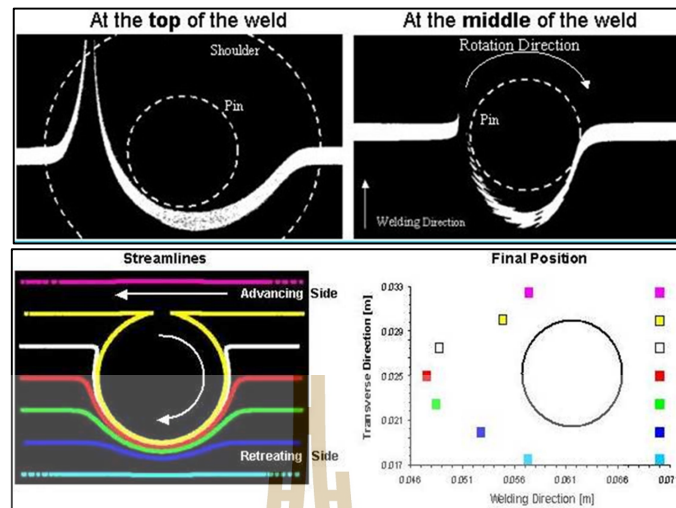
2.3 การเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (similar material welding)

เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ ในปัจจุบันส่วนใหญ่เกิดจากการนำวัสดุมากกว่าหนึ่งชิ้นมาประกอบเพื่อสร้างเป็น โครงสร้างชิ้นส่วนทางวิศวกรรม รวมไปถึงส่วนประกอบของรถยนต์ การเชื่อมเป็นกระบวนการหลักที่ถูกใช้ในการยึดวัสดุเข้าด้วยกันเนื่องจากให้ความแข็งแรงที่สูง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันกระบวนการเชื่อมได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงที่สูงขึ้น และลดระยะเวลาในการทำงานให้น้อยลง การเชื่อมโลหะในช่วงแรกๆ เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลาย

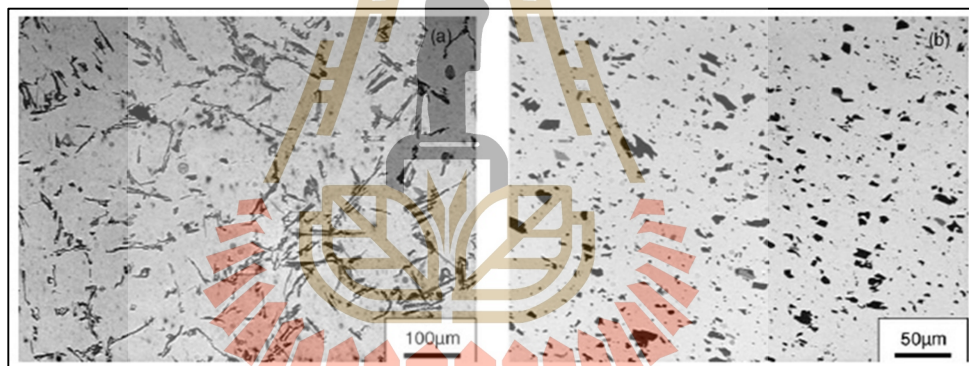
Reynolds et al. [7] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการไหลของวัสดุอะลูมิเนียม 2195A1-T8 ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยวิธีการฝังอะลูมิเนียม 5454A1-H32 แท่งกลมขนาดเล็ก ในเนื้อของอะลูมิเนียม 2195A1-T8 ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยตำแหน่งการฝังจะอยู่ติดกับแนวเส้นการเดินของหัวกวน และมีความลึกของการฝังที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาการไหลของวัสดุขณะทำการเชื่อม เมื่อนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายและกัดขึ้นรอยด้วย Keller's reagent เพื่อให้สามารถตรวจสอบการไหลของอะลูมิเนียมต่างชนิดกันได้อย่างชัดเจน พบว่าลักษณะการไหลของวัสดุที่ฝังเอาไว้ไม่มีความสมมาตร เนื้อวัสดุมีการไหลในฝั่ง Advancing เพียงเล็กน้อย แต่ในฝั่งของ Retreating เนื้อวัสดุถูกดึงให้ยืดยาวออกไปจนวนกลับมาถึงฝั่ง Advancing และบริเวณที่มีการไหลที่สูงจะอยู่ใกล้กับ shoulder หรือบ่าของหัวกวน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ Ma et al. [10] พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยซิลิคอนคาร์ไบด์มีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากในระหว่างการเชื่อมเกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุส่งผลให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัว



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของการฝังหมุด [7]

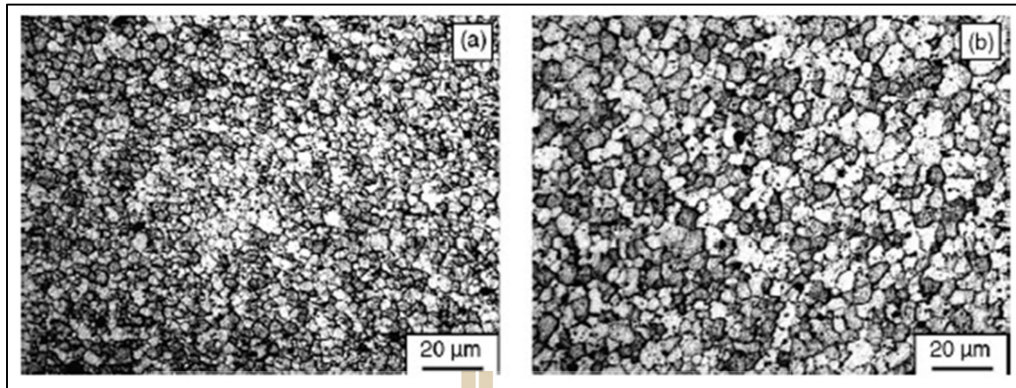


รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของหลอมดอูมิเนียม [7]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างอลูมิเนียมหล่อ ก่อนและหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [8]

Li et al. [9], Ma et al. [10], Sato et al. [11], and Kwon et al. [12] ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสถานะในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียม พบว่าขนาดของเกรนที่เกิดการตกผลึกใหม่สามารถลดขนาดได้จากการลดความเร็วในการหมุนของหัวกวน โดยที่ยังคงความเร็วในการเคลื่อนที่ไว้ หรือลดอัตราส่วนของความเร็วในการหมุนของหัวกวนต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ ω/v โดยจะส่งผลต่อพลังงานความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเมื่อ ω/v มีค่าน้อย หมายความว่าพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่ำขนาดเกรนมีความเล็กละเอียดเนื่องจากพลังงานไม่สูงพอที่เกรนจะเติบโต แต่เมื่อ ω/v มีค่าสูงพลังงานลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นเกรนจึงเกิดการโต



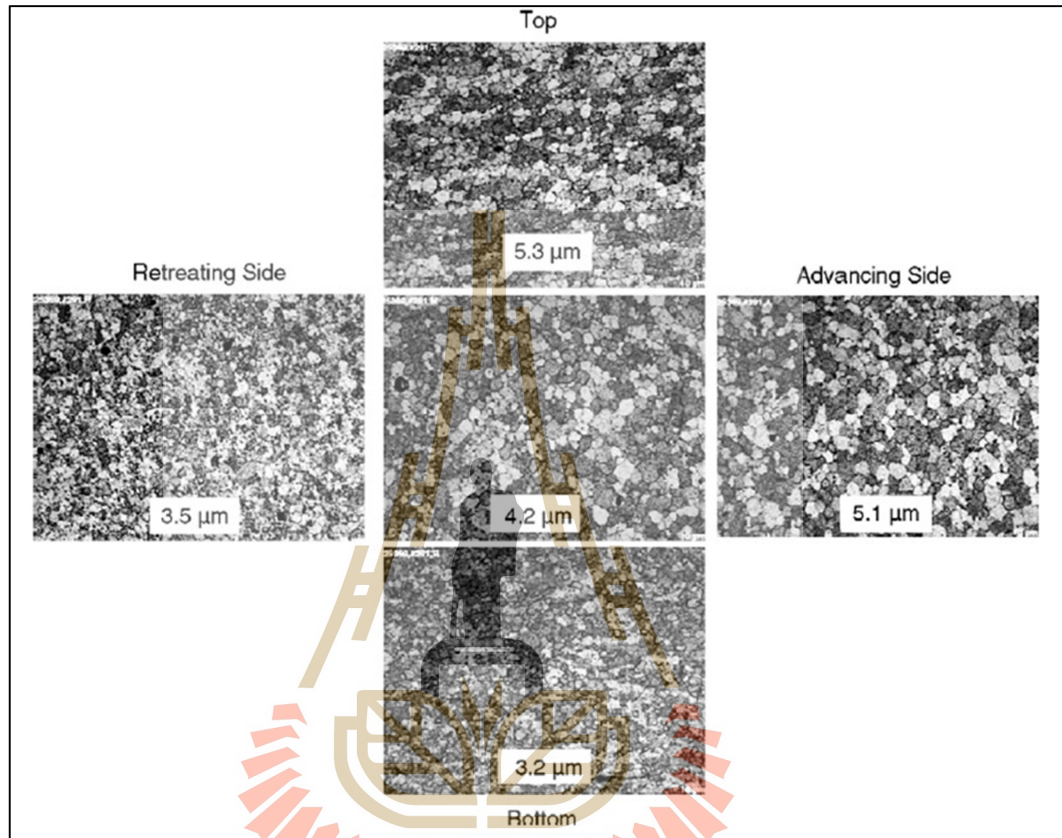
รูปที่ 2.7 ขนาดของเกรนที่แตกต่างกันในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน a) 350 rpm, 152 mm/min และ b) 400 rpm, 102 mm/min [13]

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่สภาวะแตกต่างกัน โดยมีการลดอัตราส่วนของความเร็วในการหมุนของหัวกวนต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยที่อัตราส่วนของความเร็วในการหมุนของหัวกวนต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ที่สูงขึ้นทำให้ขนาดเกรนเล็กลง

ขนาดของเกรนบริเวณรอยเชื่อมมีแนวโน้มที่จะโตบริเวณด้านบนติดกับป่าของหัวกวนและมีขนาดเล็กลงเมื่อเข้าสู่กลางรอยเชื่อม และในบริเวณด้านข้างของรอยเชื่อมจะมีด้านใดด้านหนึ่งที่มีขนาดเกรนที่เล็กกว่า ซึ่งขนาดของเกรนนี้จะมีผลสอดคล้องกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้น Mahoney et al. [13] รายงานผลการกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณต่างๆของบ่อกวน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่าด้านบนมีขนาดเกรน 5.3 μm กลางมีขนาด 4.2 μm ด้านล่างมีขนาด 3.2 μm ด้าน retreating มีขนาด 3.5 μm และด้าน advancing มีขนาด 5.1 μm ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่แตกต่างกันของบริเวณด้านบนกับด้านล่างของรอยเชื่อม เนื่องจากบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมติดกับ backing plate ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีและมีระยะเวลาในการรับความร้อนที่สั้นจึงทำให้การโตของเกรนมีน้อยเกรนจึงมีขนาดเล็ก

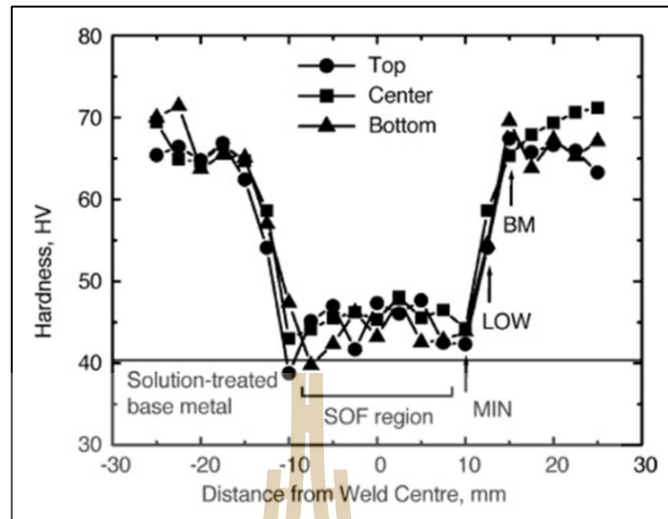
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอลูมิเนียมกลุ่มที่ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยกระบวนการทางความร้อนได้จะทำให้เกิดบริเวณที่มีความแข็งแรงต่ำรอบๆรอยเชื่อม ลักษณะดังกล่าวน่าจะเกิดจากการรวมตัวกันหรือเกิดการโตของตะกอน (coarsening) เนื่องจากความร้อนที่ได้รับในระหว่างเชื่อมเสียดทานแบบกวน Sato et al. [14] ทำการทดสอบความแข็งแรงของอลูมิเนียม 6063Al-T5 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อหาความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคกับความ

แข็งของรอยเชื่อม พบว่าความแข็งของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของตะกอนเป็นหลัก แทนที่

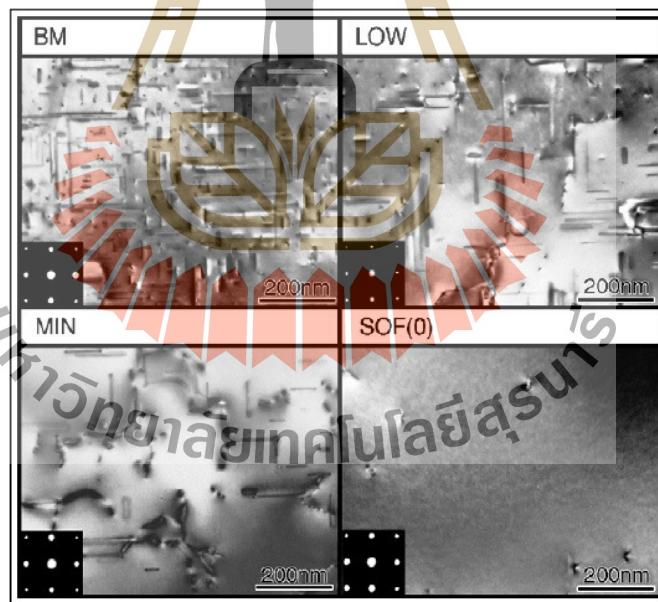


รูปที่ 2.8 ขนาดเกรน ณ บริเวณต่างๆของรอยเชื่อม [13]

จะขึ้นกับขนาดของเกรน รูปที่ 2.9 แสดงบริเวณที่เกิดการอ่อนตัวอยู่ตรงกลางรอยเชื่อมเนื่องมาจากเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงเนื่องจากการเชื่อม อุณหภูมิบริเวณนี้จะสูงทำให้เกิดการสลายตัวของตะกอนของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ส่งผลให้ดิสโลเคชัน (dislocation) เคลื่อนที่ได้ง่าย ความแข็งของชิ้นงานจึงลดลงอย่างมาก ถึงแม้บริเวณดังกล่าวจะมีขนาดเกรนที่เล็กก็ตาม แตกต่างจากบริเวณเนื้อวัสดุเริ่มต้นที่มีเกรนขนาดใหญ่กว่าแต่ไม่ได้รับความร้อนเนื่องจากกระบวนการเชื่อมจึงไม่ส่งผลต่อการละลายของตะกอน เนื้อวัสดุเริ่มต้นจึงมีความแข็งที่สูงกว่า

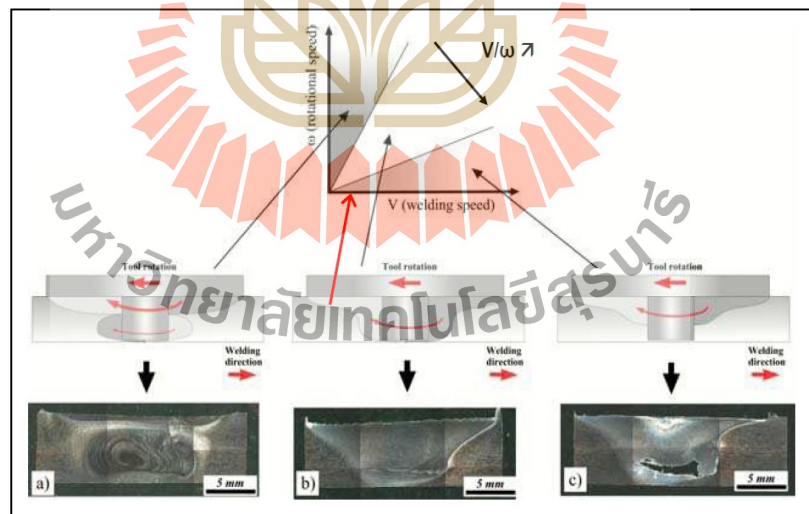


รูปที่ 2.9 การกระจายตัวค่าความแข็งของภาคตัดขวางรอยเชื่อมในทิศทางความหนา บริเวณด้านบนรอยเชื่อม กลางรอยเชื่อม และด้านล่างรอยเชื่อม [14]



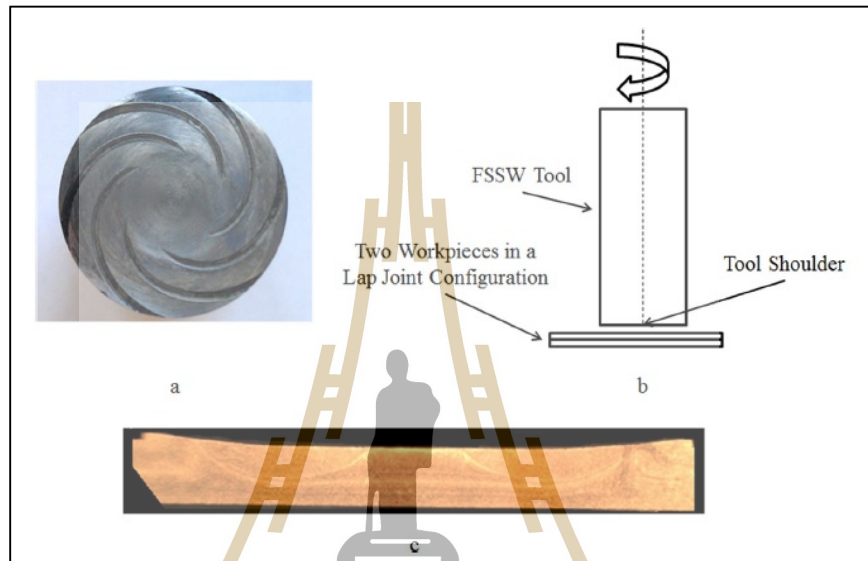
รูปที่ 2.10 แสดงขนาดและการกระจายตัวของตะกอนของแข็ง (precipitate) ในแต่ละบริเวณของรอยเชื่อม [14]

Dubourg et al. [15] ศึกษาผลของสภาวะการเชื่อมเสียดแทนแบบกวนของอลูมิเนียม 6061Al ที่ส่งผลต่อลักษณะของรอยเชื่อม พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนลักษณะของรอยเชื่อมแบ่งออกเป็นสามแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a) แบบแรกเป็นการใช้ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่สูงแต่ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ ให้ออกกวนที่ลึกฐานบ่อกวนมีความกว้างและพบมีการไหลวนของเนื้อวัสดุเป็นวงกลมมีลักษณะคล้ายหัวหอม (onion ring) หรือเรียกในอีกชื่อว่า nugget zone รอยเชื่อมในลักษณะนี้จะไม่พบ defect ในรอยเชื่อมเนื่องจากเนื้อวัสดุมีการไหลวนไปเติมบริเวณช่องว่างได้ดีดังแสดงในรูปที่ 2.11 (b) แบบที่สองใช้ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่อยู่ในระดับกลางและความเร็วในการเคลื่อนที่ระดับกลาง ให้ออกกวนที่ลึกฐานบ่อกวนแคบและไม่เกิดลักษณะของ nugget zone เนื่องจากความเร็วในการกวนที่ไม่สูงเนื้อวัสดุมีการไหลวนต่ำลักษณะของบ่อกวนแบบที่สองจะพบ defect บ้างเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.11 (c) แบบที่สามใช้ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่ต่ำแต่ความเร็วในการเคลื่อนที่สูง บ่อกวนแคบและตื้นเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่สูงในขณะที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีต่ำ บ่อกวนจะพบข้อบกพร่องในปริมาณมาก ลักษณะที่พบบ่อย คือ tunnel defect ในบางครั้งด้านบนของรอยเชื่อมดูปกติแต่ภายในเกิดเป็นช่องว่าง



รูปที่ 2.11 ลักษณะของรอยเชื่อมที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนและความเร็วในการเคลื่อนที่ [15]

Chase D. Cox et al. [16] ศึกษาพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดโลหะผสมอลูมิเนียม 6061Al ในลักษณะซ้อนทับ ลักษณะของหัวกวนมีการก่อร่างเป็นเส้นยาวหกเส้นเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานในระหว่างการเชื่อมและช่วยให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลที่ดี กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดและชิ้นงานหลังเชื่อมเสียดทานแบบจุดนี้แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเชื่อมเสียดทานแบบจุด [16] a) ลักษณะของหัวกวน b) การวางชิ้นงานและการเชื่อม c) ชิ้นงานหลังการเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดชิ้นงานจะเริ่มได้รับพลังงานพลังงานความร้อนจากแรงเสียดทานก็ต่อเมื่อหัวกวนสัมผัสกับชิ้นงาน พลังงานที่ใส่ให้กับชิ้นงานขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ ดังนั้นพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบจุดสามารถทำได้จากสมการที่ 1

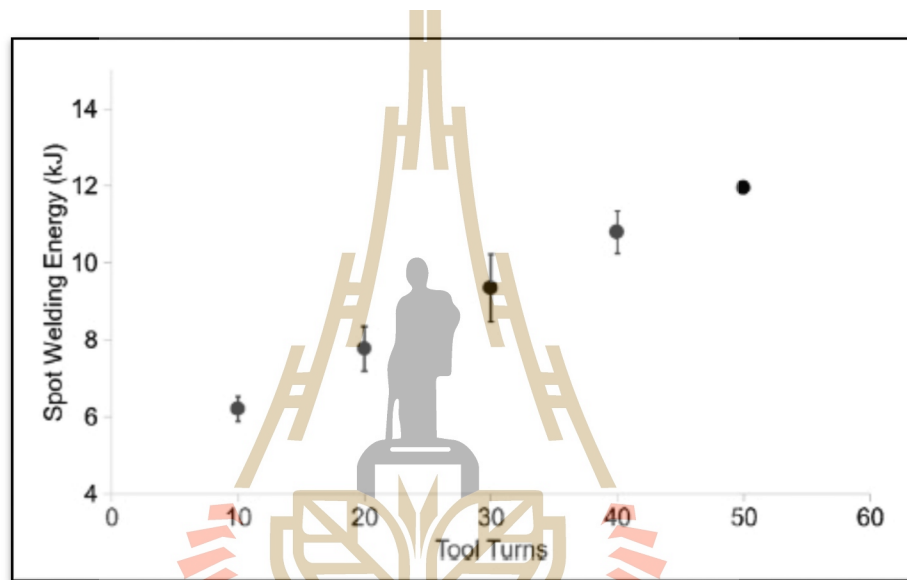
$$w_{el} \text{ energy} = \int_{\text{tool contact}}^{\text{tool retraction}} (\omega M) dt \quad (2.1)$$

เมื่อ

ω คือความเร็วในการหมุนของหัวกวน (rad/s)

M คือแรงบิด (N.m)

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการเชื่อมกับจำนวนครั้งในการกด (tool turns) หัวกวนลงบนชิ้นงาน พบว่าเมื่อจำนวนครั้งในการกดหัวกวนลงบนชิ้นงานเพิ่มขึ้นพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนระยะเวลาที่หัวกวนสัมผัสชิ้นงานนานขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่สูงและเวลาในการจุ่มแช่ของหัวกวนที่ต่ำทำให้พลังงานในการเชื่อมที่ต่ำ ในทำนองเดียวกันความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่สูงให้พลังงานในการเชื่อมที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.13



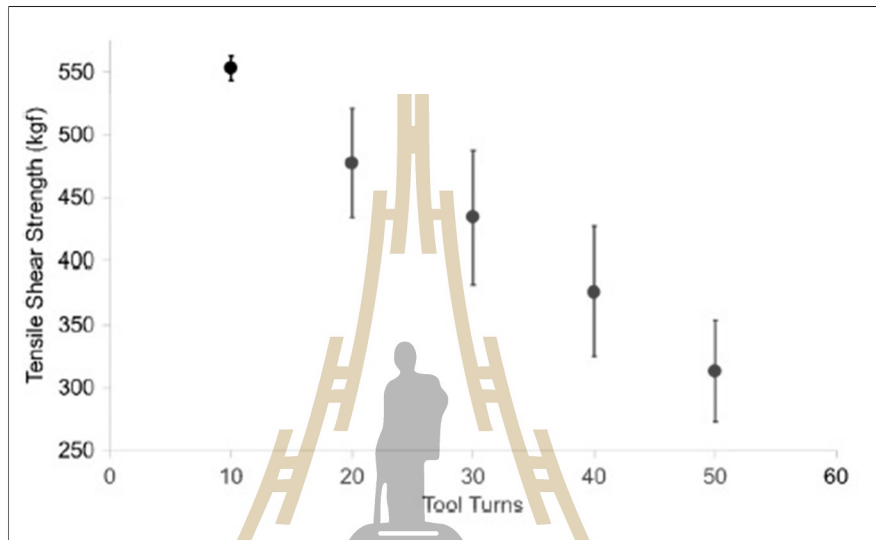
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการเชื่อมกับจำนวนครั้งในการกดหัวกวนลงบนชิ้นงาน [16]

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการเชื่อมกับจำนวนครั้งในการกดหัวกวนลงบนชิ้นงานพบว่ากราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังนั้นสามารถสร้างสมการเพื่อประเมินพลังงานในการเชื่อมได้ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\text{weld energy}(kJ) = 0.15x \text{ number of tool turns} + 4.86 \quad (2.2)$$

หลังจากการเชื่อมเสียคนแบบจุดที่สภาวะแตกต่างกัน ได้นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงดึง พบว่าจำนวนครั้งในการกดหัวกวนลงบนชิ้นงานเพิ่มขึ้นความแข็งแรงดึงของชิ้นงานลดลงใน

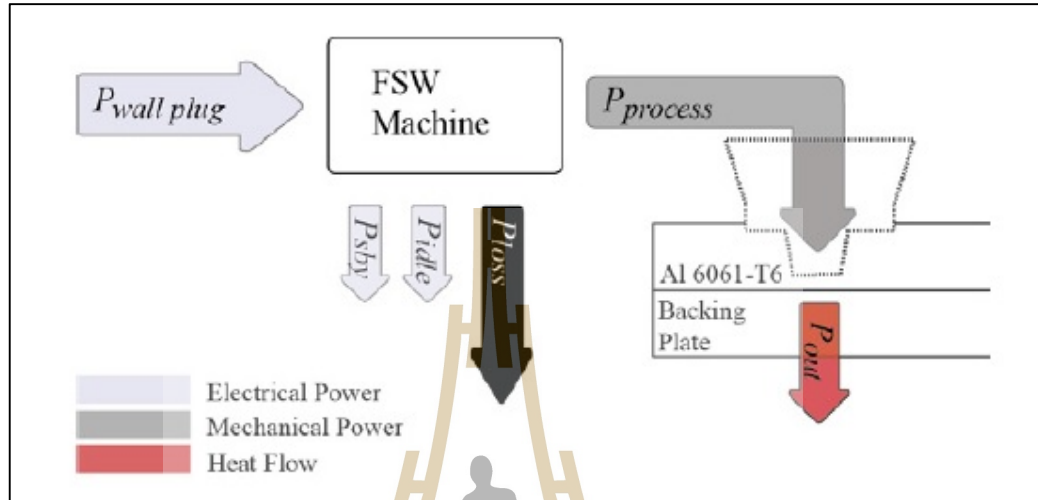
ลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากผลการวิจัยพบว่าที่ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนสูงและเวลาในการจุ่มแช่ของหัวกวนต่ำให้ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานสูงที่สุด เนื่องจากพลังงานที่เข้าสู่รอยเชื่อมต่ำส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคหรือเกรนของชิ้นงานมีขนาดเล็กละเอียดเกิดการโตหรือการขยายตัวของเกรนต่ำ



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งในการกดหัวกวนลงบนชิ้นงานกับความแข็งแรงดึง [16]

WoongJo Choi et al. [17] ศึกษาพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 6061-T6 ในลักษณะต่อชน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนและแผ่นรองเชื่อม (backing plates) ซึ่งแผ่นรองเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากวัสดุที่แตกต่างกันสามชนิดคือ ทองแดง เหล็ก และไทเทเนียม พลังงานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ 1) พลังงานไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้กับเครื่องจักร ($P_{wall\ plug}$) เพื่อใช้ในการทำงาน ในระหว่างที่เครื่องจักรไม่ได้รับภาระกรรมทางกลพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้เรียกว่ากำลังสแตนด์บาย (P_{sby}) พลังงานที่ยังไม่ได้ใช้งาน (P_{idle}) และมีพลังงานไฟฟ้าบางส่วนที่สูญเสียไปกับระบบ (P_{loss}) เมื่อเครื่องจักรทำงานโดยรับภาระกรรมทางกลหรือดำเนินการเชื่อม พลังงานไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานแบบที่ 2) คือพลังงานเชิงกลหรือพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ($P_{process}$) ซึ่งระหว่างการเชื่อมเกิดการเสียดทาน

พลังงานเชิงกลเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทให้กับชิ้นงาน แผ่นรองเชื่อมและบรรยากาศรอบข้าง (P_{out}) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [17]

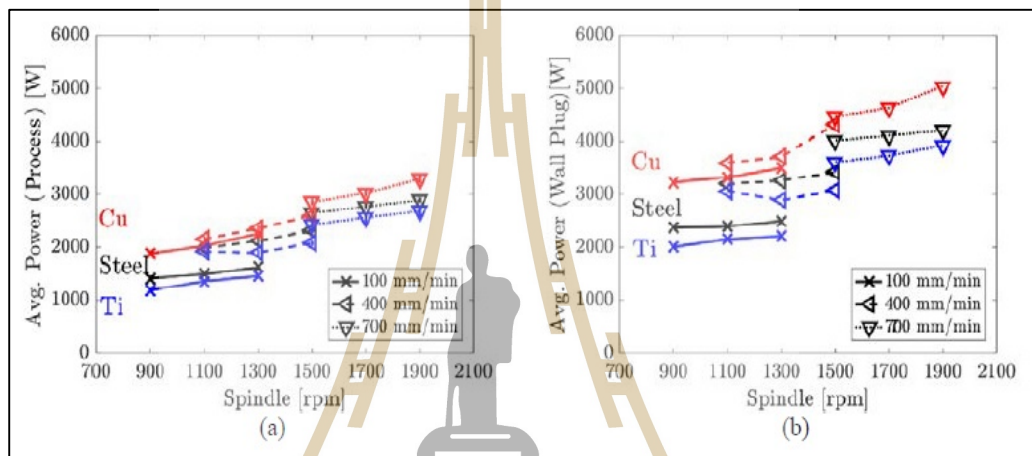
จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน พลังงานไม่มีการสูญหายแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ เช่น พลังงานจลน์เปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ หรือพลังงานศักย์เปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ นั่นหมายถึง พลังงานรวมของวัตถุมีค่าคงที่เสมอหรือผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์มีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถหาได้จาก สมการที่ 3

$$P_{wall\ plug} = P_{sby} + P_{idle} + P_{loss} + P_{process} \quad (2.3)$$

เมื่อสมมุติให้กำลังสแตนด์บาย (P_{sby}) พลังงานที่ยังไม่ได้ใช้งาน (P_{idle}) และมีพลังงานไฟฟ้าบางส่วนที่สูญเสียไปกับระบบ (P_{loss}) มีค่าคงที่ในทุกสภาวะ ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับชิ้นงาน แผ่นรองเชื่อมและบรรยากาศรอบข้าง (P_{out}) หาได้จาก พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ($P_{process}$) ดังแสดงในสมการที่ 4

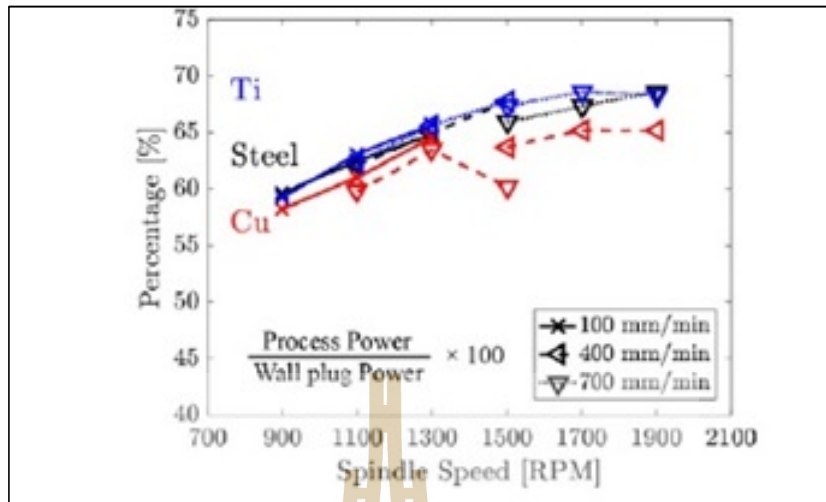
$$P_{process} = \tau_{avg} \times \omega \times \frac{2\pi}{60} + f_{travel\ avg} \times v \times \frac{1}{60 \times 1000} \quad (2.4)$$

เมื่อนำพลังงานที่ได้จากระบบและพลังงานไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้กับเครื่องจักรมาสร้างความสัมพันธ์กับความเร็วยรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน พบว่าเมื่อความเร็วยรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนเพิ่มขึ้นทั้งพลังงานที่ได้จากระบบและพลังงานไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้กับเครื่องจักรเพิ่มขึ้น และแผ่นรองเชื่อมทองแดงมีความสามารถในการถ่ายเทพลังงานความร้อนได้เร็วจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้พลังงานทางกลที่สูงเพื่อสร้างพลังงานความร้อนให้กับรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความเร็วยรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน [17]

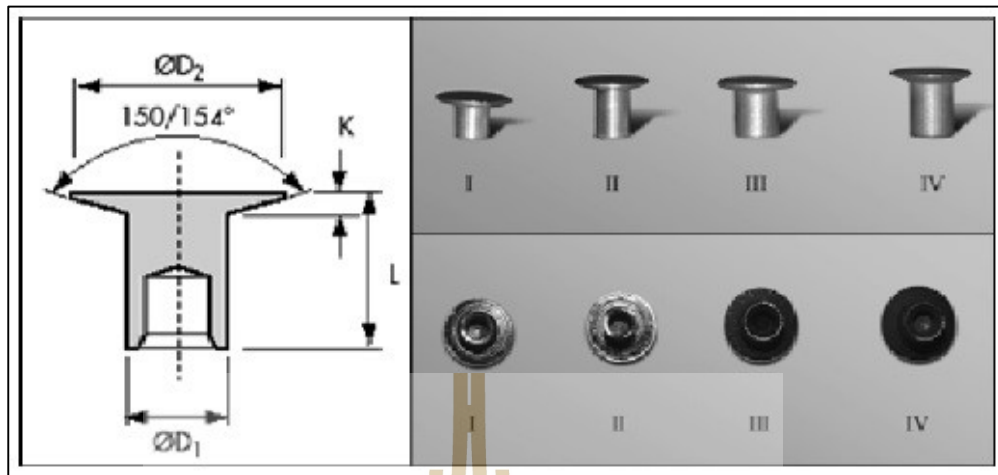
หาสัดส่วนของพลังงานเชิงกลที่เกิดจากระบบการต่อพลังงานไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้กับเครื่องจักร พบว่าเมื่อความเร็วยรอบในการหมุนของหัวกวนเพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ต่างจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน ซึ่งความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวกวน 700 mm/min ใช้อัตราส่วนพลังงานที่ต่ำกว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ 400 mm/min เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนสูงระยะเวลาที่หัวกวนสัมผัสชิ้นงานสั้นพลังงานความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานต่ำ สัดส่วนของพลังงานเชิงกลจึงน้อยกว่าที่สภาวะการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่ 400 และ 100 mm/min ในกรณีของแผ่นรองเชื่อมที่ทำจากไทเทเนียมและทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความเร็วในการหมุนของหัวควนและความเร็วในการเคลื่อนที่ต่อสัดส่วนของพลังงานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อม [17]

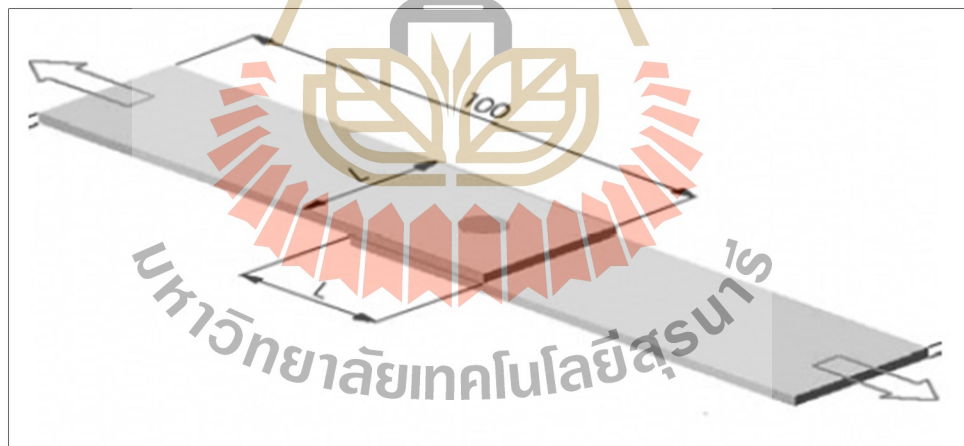
2.4 การเชื่อมโลหะต่างชนิดและการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะกับพลาสติก (dissimilar materials welding)

กระบวนการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่มีน้ำหนักเบาที่มีความสำคัญทางด้านการพัฒนาวัสดุทางวิศวกรรมเป็นอย่างมากเนื่องจากการเชื่อมวัสดุต่างชนิดจะส่งผลให้ได้คุณสมบัติของวัสดุชนิดนั้นๆ ที่นำมาเชื่อมทำให้ชิ้นงานที่ได้สามารถนำไปใช้ได้กว้างขึ้นในทางคุณสมบัติของวัสดุ เช่น งานโครงสร้าง งานทางด้านยานยนต์ งานทางด้านชิ้นส่วนอากาศยาน ซึ่งในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดส่วนใหญ่ จะใช้วิธีการเชื่อมที่เป็นเทคโนโลยีใหม่อย่างเช่น การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (laser welding) การเชื่อมด้วยการสั่น (ultrasonic welding) การเชื่อมแบบเสียดทานแบบจุด (friction stir spot welding) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (friction stir welding) ในช่วงเวลาประมาณ 25 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิดอย่างหลากหลาย โดยเฉพาะวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงอย่างเช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม รวมไปถึงวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ โดยจุดประสงค์ของการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่มีน้ำหนักเบาเพื่อเพิ่มสัดส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักของวัสดุ (weight-to-strength Ratio) โดยในช่วงแรกๆของการเชื่อมหรือยึดติดวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกันจะใช้วิธีการยึดด้วยหมุด (rivets) ดังเช่นที่ L. Settineri et al., [18] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (FEPO4) กับพอลิเมอร์ (PPE, PC, RTM, SMC) ด้วยวิธีการยึดหมุดที่มีขนาดแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยวัสดุที่ใช้ทำหมุดคือเหล็กผสม โบรอนเคลือบผิวด้วย Zi-Pb-Al



รูปที่ 2.18 รูปทรงต่างๆของหมุดที่ใช้ในการทดลองยึดวัสดุแผ่นต่างชนิดกัน [18]

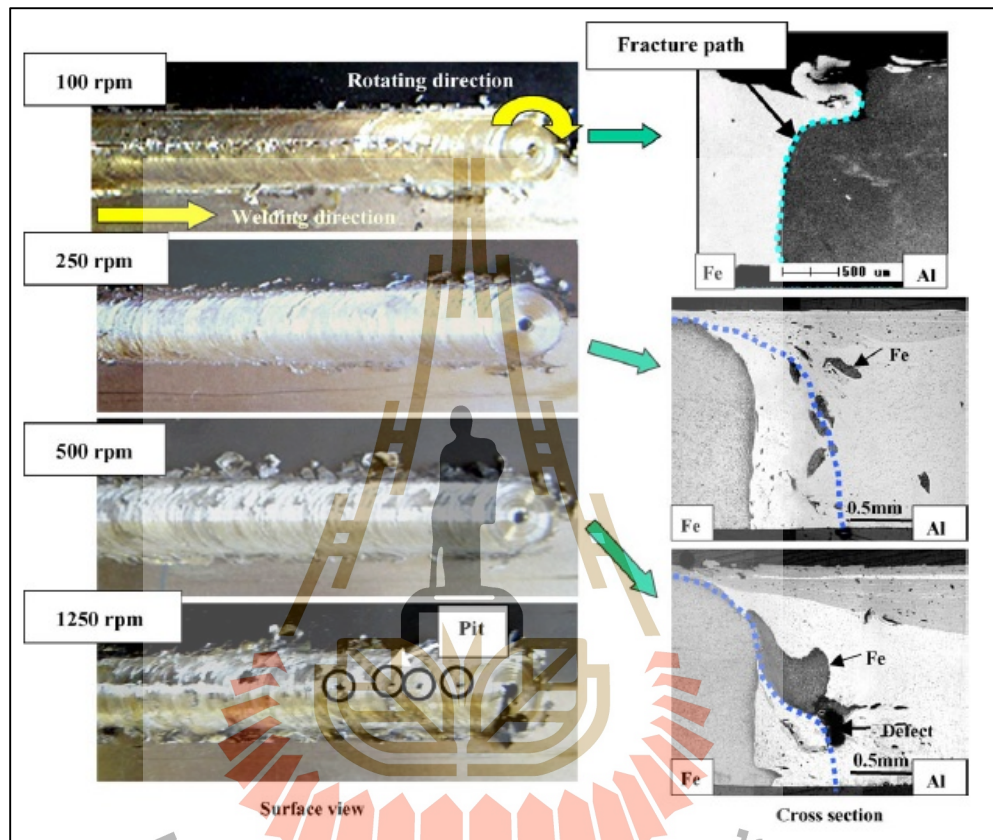
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดกว้าง X ยาว เท่ากับ 25 X 100 mm โดยในการยึดหมุดจะทำการยึดที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงานบริเวณที่ซ้อนกันของโลหะกับพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การยึดด้วยหมุดระหว่างโลหะกับพอลิเมอร์ [18]

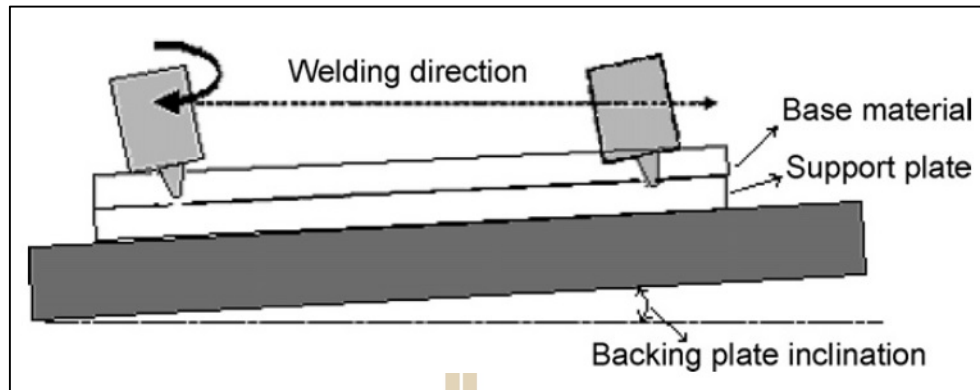
Takehiko Watanabe et al. [19] ได้ศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 กับอลูมิเนียม 5083 โดยใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) พบว่าความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่ 250 รอบต่อนาที และตำแหน่งของหัวกวนที่ 0.2 มิลลิเมตร เคลื่อนไปทางด้านอลูมิเนียม ให้รอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) มีค่าสูงสุดถึง 86

เปอร์เซ็นต์ของวัสดุพื้น และการกระจายตัวของเหล็กในโลหะผสมอลูมิเนียมที่ดีดังแสดงในรูปที่ 2.20 และยังพบว่าในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดนั้นต้องวางวัสดุที่อ่อนกว่าไว้ทางด้าน Retreating จะได้รอยเชื่อมที่ยึดติดกันอย่างสมบูรณ์



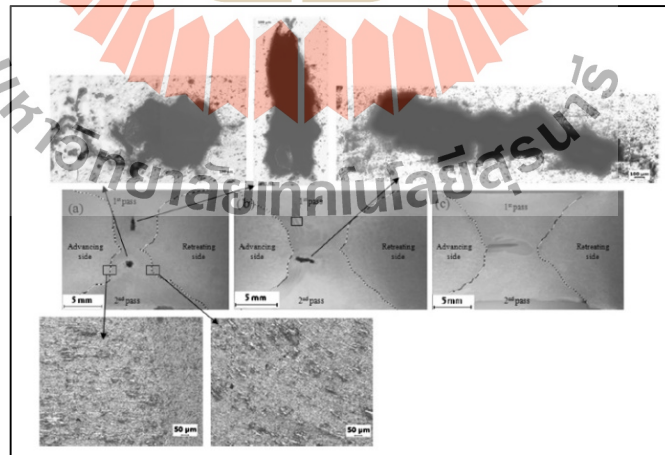
รูปที่ 2.20 ผลกระทบของความเร็วยกในการเชื่อมที่มีต่อรอยเชื่อม [19]

K. Kumar et al. [20] ได้ทำการศึกษาผลของแรงกดในแนวแกนของหัวกวนและผลของระยะสัมผัสสว่า (shoulder) ของหัวกวน ที่ส่งผลต่อรอยเชื่อมและจุดบกพร่อง (defect) ในการทดลองพบว่าตั้งแต่แรงกดในแนวแกนที่ 7.4 กิโลนิวตัน ขึ้นไปไม่พบจุดบกพร่องในรอยเชื่อม เนื่องจากบ่า (shoulder) ของหัวกวนสัมผัสกับผิวชิ้นงานทั้งระนาบทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสีทำให้เนื้อของวัสดุเกิดการไหลได้สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.21



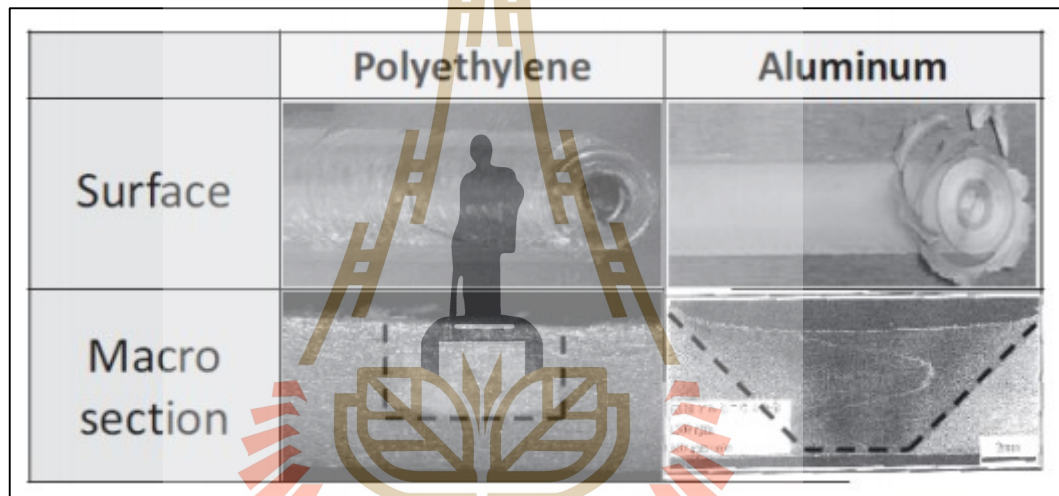
รูปที่ 2.21 การทดลองเพิ่มแรงกดในแนวแกนจาก 4 กิโลนิวตัน จนถึง 10.9 กิโลนิวตัน [20]

F. Cioffi et al. [21] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนที่ส่งผลต่อจุดบกพร่องที่เป็นโพรงใต้แนวเชื่อม (tunnel defect) ของอลูมิเนียมผสมอนุภาคเสริมแรง 2124Al/25vol%SiCp โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องคือความเร็วรอบในการหมุนเนื่องจากที่ความเร็วรอบสูงๆจะให้ความร้อนจากการเสียดทานมากเกิดการไหลของวัสดุที่ดีทำให้เนื้อโลหะสามารถเติมเต็มบริเวณพื้นที่ด้านหลังการเคลื่อนที่ผ่านของหัวกวนได้สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.22 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมและพลาสติกด้วยวิธีการ FSW ในงานวิจัยก่อนหน้า ดังนี้คือ



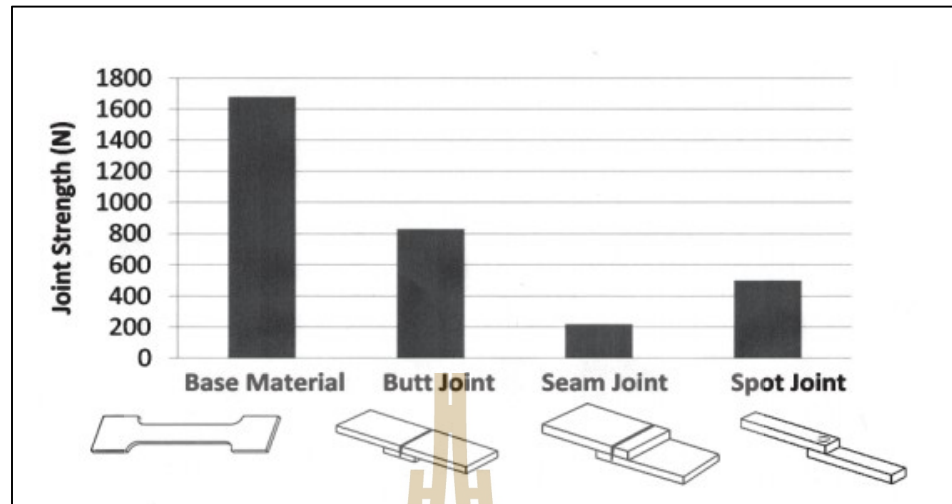
รูปที่ 2.22 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน a) ความเร็วรอบ 300 rpm b) ความเร็วรอบ 550 rpm
c) ความเร็วรอบ 800 rpm [21]

H. Hira et al. [22] ทำการศึกษาพฤติกรรมของเทอร์โมพลาสติกหลายแบบเช่น polyethylene, poly-Amid 6 (PA6), Poly Phenylene Sulfide (PPS), Acryl หลังจากการเชื่อมแบบ friction stir welding และ friction stir spot welding เปรียบเทียบกับโลหะผสมอลูมิเนียม พบว่า บริเวณที่เกิดการไหลของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมมีความกว้างกว่าบริเวณที่เกิดการไหลของ polyethylene เนื่องจากโลหะผสมอลูมิเนียมมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดีจึงส่งผลให้บริเวณที่ได้รับความร้อนกว้างและเมื่อได้รับแรงทางกลบริเวณที่เกิดการไหลของเนื้อวัสดุจึงกว้างตามไปด้วย ต่างจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำการไหลของเนื้อวัสดุ จึงเกิดบริเวณรอบหัวกวนเป็นหลัก ซึ่งมีความสอดคล้องเมื่อคิดจากคุณสมบัติของวัสดุ



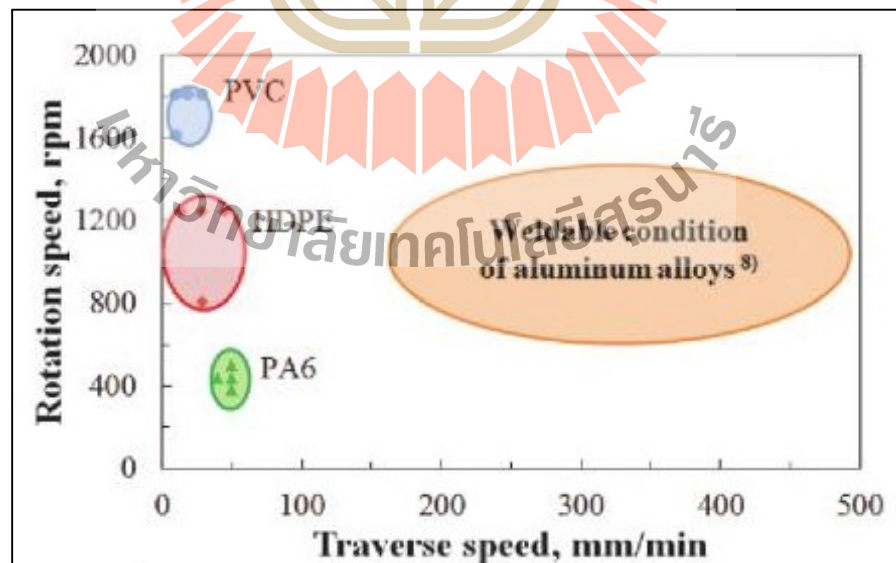
รูปที่ 2.23 ลักษณะรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง [22]

ในทางสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ทำกรเชื่อมทั้งในแบบ FSW และ FSSW ในลักษณะต่อชน และทับซ้อนกัน ค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบแรงดึง (tensile test) พบว่า FSW เชื่อมในลักษณะต่อชนให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาเป็นแบบ FSSW แบบจุดเดี่ยว และต่ำสุดคือ FSSW ในลักษณะตะเข็บ ดังแสดงในรูป 2.24



รูปที่ 2.24 ความแข็งแรงของรอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมที่แตกต่างกัน [22]

S. Inaniwa et al. [23] ศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมวัสดุพลาสติก HDPE, PA6, PVC เพื่อศึกษาความสามารถในการเชื่อมของวัสดุและความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยเปรียบเทียบกับโลหะอลูมิเนียม หลังจากการเชื่อมพบว่าเงื่อนไขในการเชื่อม (welding conditions) เป็นไปตามดังแสดงในรูป 2.25



รูปที่ 2.25 เงื่อนไขในการเชื่อมของพลาสติกชนิดต่างๆ [23]

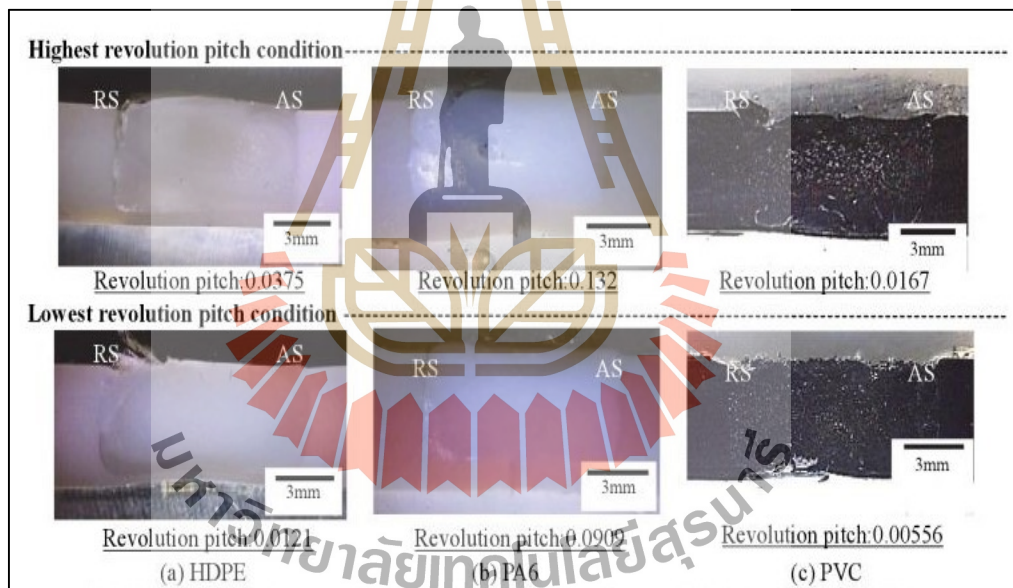
ค่าความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมสามารถบ่งชี้ได้โดย revolution pitch ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Revolution pitch} = \frac{T \text{ mm/min}}{R \text{ rpm}}$$

T คือความเร็วในการเดินหัวเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)

R คือความเร็วรอบของหัวเชื่อม (รอบต่อนาที)

เมื่อตรวจสอบ โครงสร้างภาพตัดขวางและรอยเชื่อมพบว่าที่ค่า revolution pitch สูงเกิดช่องว่างเกิดขึ้นบริเวณ retreating side ของวัสดุ PA6 และ PVC แต่ใน HDPE ไม่พบช่องว่างเนื่องจากมีค่าความร้อนที่เกิดในขณะที่ทำการเชื่อมที่ค่าดังแสดงในรูป 2.26

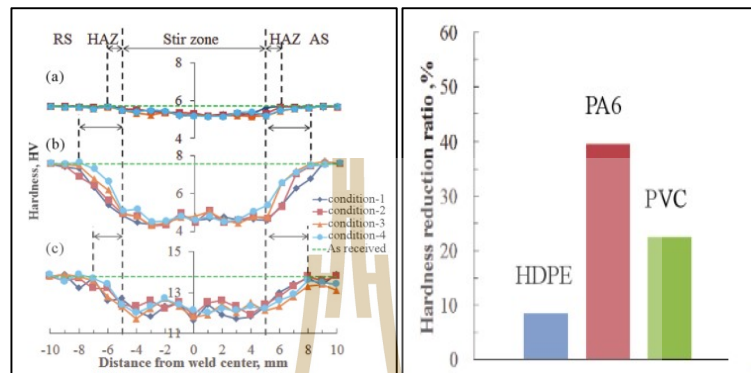


รูปที่ 2.26 ภาพตัดขวางของรอยเชื่อม HDPE, PA6, PVC ที่เงื่อนไขการเชื่อมต่างกัน [23]

ในด้านความแข็งของวัสดุหลังการเชื่อม วัสดุมีความแข็งลดลงเป็นสัดส่วน โดยสามารถหาจากสมการดังต่อไปนี้

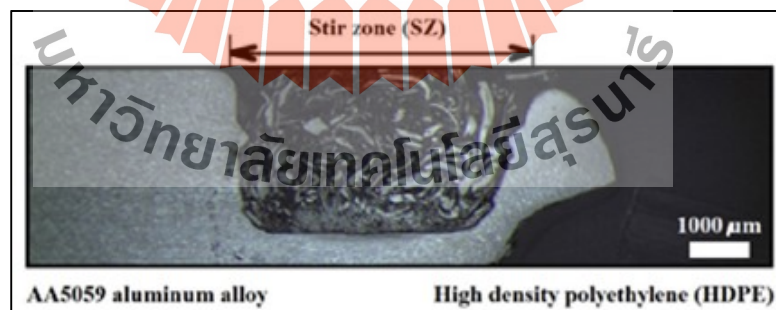
$$\text{Hardness reduction ratio, \%} = \frac{\text{base material, HV} - \text{weld center, HV}}{\text{base material, HV}}$$

โดย PA6 มีค่าความแข็งลดลงถึงประมาณ 40 % และ PVC ลดลงประมาณ 20% โดย HDPE มีค่าความแข็งลดลงน้อยที่สุดอยู่ที่ประมาณ 10% ดังแสดงในรูป 2.27



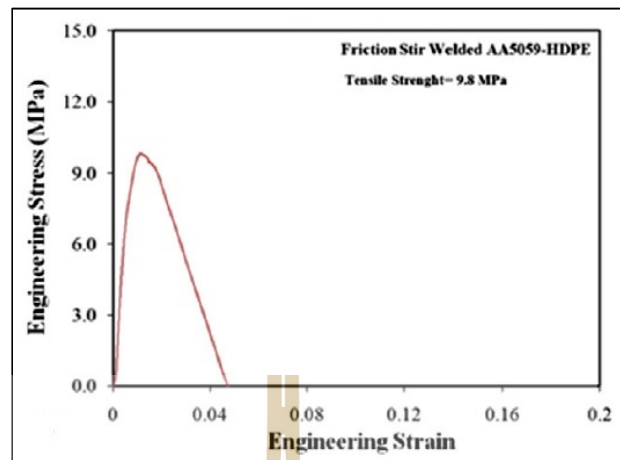
รูปที่ 2.27 ความแข็งบริเวณรอยเชื่อมและสัดส่วนของความแข็งที่ลดลง [23]

F. Khodabakhshi et al. [24] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมโลหะอลูมิเนียมเกรด AA5059 กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้วิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่าในการยึดติดกันของวัสดุสองชนิดเกิดจากกลไกการยึดเกี่ยวเชิงกล (mechanical interlocking) ของวัสดุแทนที่จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังแสดงในรูป 2.28



รูปที่ 2.28 กลไกการยึดเกี่ยวเชิงกล (mechanical interlocking) ในการเชื่อม [24]

เมื่อนำวัสดุที่ทำการศึกษาไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง พบว่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ทำการศึกษาเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงเป็นครึ่งหนึ่งของวัสดุพื้น HDPE ดังแสดงในรูป 2.29



รูปที่ 2.29 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน AI-HDPE ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [24]

หลังจากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมพบว่าบริเวณที่เกิดการแตกหักเป็นบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน (AA5059-HDPE interface) ดังแสดงในรูป 2.30



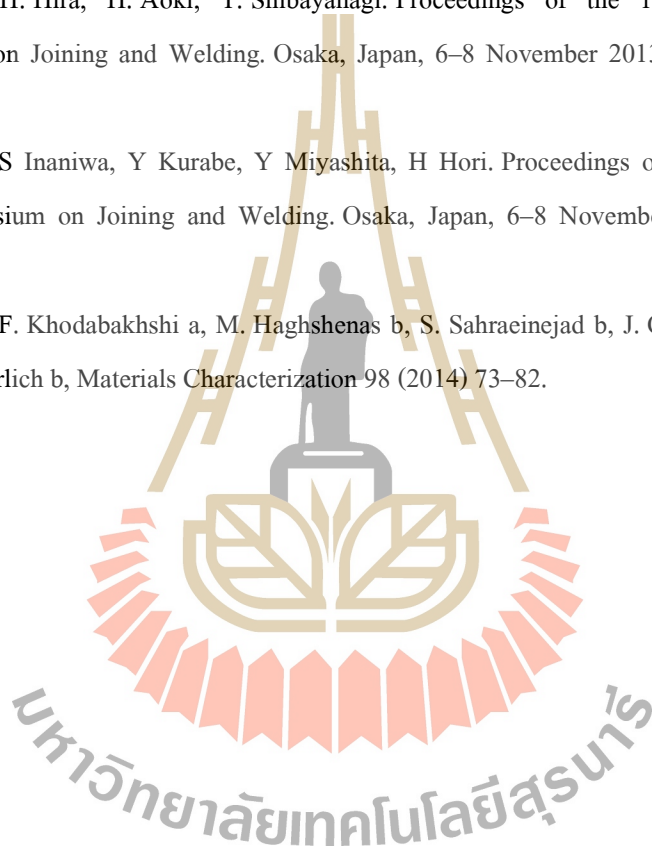
รูปที่ 2.30 บริเวณที่เกิดการแตกหักของรอยเชื่อม FSW ระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง [24]

เนื่องจากบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความแข็งเท่ากับ 6.8 HV ซึ่งต่ำกว่าบริเวณ stir zone ที่มีความแข็ง 10.4 HV เนื่องจากบริเวณ stir zone เกิดการกวนผสมกันของเศษวัสดุสองชนิดที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมคล้ายกับเกรนอิครีแอคร์ขนาดประมาณ $40\ \mu\text{m}$ ทำให้มีความแข็งแรงที่สูงกว่าบริเวณรอยต่อระหว่าง AA5059-HDPE

2.5 รายการอ้างอิง

- [1] <https://th.wikipedia.org/wiki/การเชื่อม>
- [2] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B. Patent Application No.9125978.8 (December 1991).
- [3] W.M. Thomas, et al., Friction stir welding, International Patent Application PCT/GB92/02203.
- [4] S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure, Scripta Mater. 41 (1999) 809.
- [5] L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, Mater. Res. Innovat. 2 (1998) 150.
- [6] Pedro Vilaça, João Gandra and Catarina Vidal. book edited by Zaki Ahmad, ISBN 978-953-51-0861-0, Published: December 5, 2012 under CC BY 3.0 license. © The Author(s).
- [7] A.P. Reynolds, Sci. Technol. Weld. Joining 5 (2000) 120.
- [8] Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, Unpublished results.
- [9] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure, Mater. Sci. Eng. A 271 (1999) 213.
- [10] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, Acta Mater. 50 (2002) 4419.
- [11] Y.S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, Metall. Mater. Trans. A 33 (2002) 625.
- [12] Y.J. Kwon, N. Saito, I. Shigematsu, J. Mater. Sci. Lett. 21 (2002) 1473.
- [13] M. Mahoney, R.S. Mishra, T. Nelson, J. Flintoff, R. Islamgaliev, Y. Hovansky, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Fiedel (Eds.), Friction Stir Welding and Processing, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001, p.183.
- [14] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enmoto, S. Jogan, Metall. Mater. Trans. A 30 (1999) 2429.
- [15] Dubourg, et al. 6th Int. FSW Symp., St Sauveur, Canada, 2006.
- [16] Chase D. Cox, Brian T. Gibson, Alvin M. Strauss, George E. Cook, Energy input during friction stir spot welding, Journal of Manufacturing Processes 16 (2014) 479–484.
- [17] WoongJo Choi, Justin D. Morrow, Frank E. Pfefferkorn, Michael R. Zinn, The effects of welding parameters and backing plate diffusivity on energy consumption in friction stir welding, Procedia Manufacturing 10 (2017) 382 – 391.
- [18] L. Settineri, E. Atzeni, R. Ippolito. Self piercing riveting for metal-polymer joints. International journal of material forming, vol.3, supplement1, 995-998.

- [19] Takehiko Watanabe, Hirofumi Takayama, Atsushi Yanagisawa, *Journal of Materials Processing Technology* 178 (2006) 342–349.
- [20] K. Kumar, Satish V. Kailas, *Materials Science and Engineering A* 485 (2008) 367–374.
- [21] F. Cioffi a, R. Fernandez a, D. Gesto b, P. Rey c, D. Verdera b, G. Gonzalez-Doncel, *Composites: Part A* 54 (2013) 117–123.
- [22] H. Hira, H. Aoki, T. Shibayanagi. *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*. Osaka, Japan, 6–8 November 2013. ISBN: 978-1-78242-163-4.
- [23] S Inaniwa, Y Kurabe, Y Miyashita, H Hori. *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*. Osaka, Japan, 6–8 November 2013. ISBN: 978-1-78242-163-4.
- [24] F. Khodabakhshi a, M. Haghshenas b, S. Sahraeinejad b, J. Chenc, B. Shalchi c, J. Li c, A.P. Gerlich b, *Materials Characterization* 98 (2014) 73–82.



บทที่ 3

การปั่นกวนโลหะผสมอลูมิเนียม A6063-T831

ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

(Stir on the Plastic to A6063-T831 by Friction Stir Welding)

3.1 บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของพลังงานต่อระยะทางที่ลงสู่ชิ้นงานกวนด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A6063-T831 ที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการกวน คือ อัตราการหมุนหัวกวนในช่วง 450 ถึง 1120 รอบต่อนาที และความเร็วในการเคลื่อนที่หัวกวนในช่วง 28 ถึง 112 มิลลิเมตรต่อนาที ต่อลักษณะของรอยกวน และสมบัติเชิงกล จากการศึกษาพบว่าขนาดบ่อกวนบริเวณผิวชิ้นงานด้านบนที่สัมผัสกับหัวกวน และด้านล่างที่สัมผัสกับแผ่นรองไม่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานที่ลงสู่รอยกวน ในขณะที่ขนาดของบ่อกวนบริเวณใต้บ่าหัวกวนลงมาประมาณ 1/4 ของความหนาชิ้นงานขนาดของบ่อกวนกว้างขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเกรนในชิ้นงานกวนขึ้นกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางเพียงเล็กน้อย โดยขนาดเกรนเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติเชิงกลของชิ้นงานกวน โลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A6063-T831 ในการศึกษาี้เกิดสูญเสียความแข็งแรงที่ได้จากกลไกการตกตะกอนของแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียมทำให้ความแข็งแรงของรอยกวนขึ้นกับ กลไกการเพิ่มขอบเกรน และกลไกการเพิ่มความเครียดเป็นหลัก

3.2 บทนำ

โลหะผสมอลูมิเนียมมีการใช้งานอย่างแพร่หลายโดยถูกผลิตเป็น โครงสร้างบ้านเรือน ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนอากาศยานและชิ้นส่วนอากาศยานจนกระทั่งชิ้นส่วนตัวถังเรือ [2,3,4,5] ซึ่งการนำชิ้นส่วนโลหะผสมอลูมิเนียมไปใช้งานในบางกรณีจำเป็นต้องมีการเชื่อมยึดติดชิ้นส่วนโลหะ

ผสมอลูมิเนียมเข้าด้วยกัน กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นหนึ่งในกระบวนการเชื่อมที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเชื่อมเนื่องจากภายหลังการเชื่อมให้รอยเชื่อมที่แข็งแรง ชี้นงานบิดเบือนน้อย ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวนโดยทั่วไปจะทำการศึกษาผลของตัวแปรหลักๆ เช่น ความเร็วรอบของการหมุน (rotating speed) และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน (traveling speed) ต่อคุณภาพงานเชื่อม รวมถึงมุมเอียงของหัวกวน (tilt angle) อย่างไรก็ตามตัวแปรข้างต้นนั้นเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักร ไม่ใช่ตัวแปรทางวิทยาศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาในเนื้อของโลหะ ทำให้การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงยังขาดความลุ่มลึก ด้วยตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาต่าง ๆ นั้นล้วนเกี่ยวข้องกับพลังงานทั้งหมด ดังนั้นถ้าทำการวัดพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวน น่าจะทำให้เข้าใจกระบวนการเชื่อมดีขึ้น อนึ่งยังมีการศึกษาในวงแคบถึงผลกระทบของพลังงานที่ชิ้นงานเชื่อมได้รับต่อการเปลี่ยนแปลงในงานเชื่อม ดังนั้นผลการศึกษานี้ถูกออกแบบมาเพื่อศึกษาผลกระทบของพลังงานลงสู่ชิ้นงานเชื่อมซึ่งสัมพันธ์กับสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของรอยเชื่อม

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.3.1 วัสดุและหัวกวน

โลหะที่ใช้ในการทดลองเป็นกวนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนคือโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A6063-H831 ความหนา 6.4 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของหัวกวนที่ใช้กวน

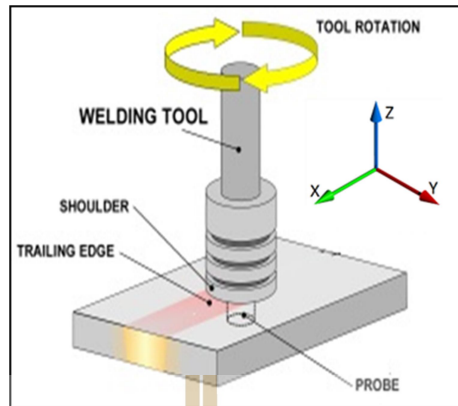
ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการถน กว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หัวถนมีลักษณะเป็น ทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของบ่า (shoulder) 24 มิลลิเมตร และตัวถน (pin) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความสูง 5.7 มิลลิเมตร ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือทำงาน ร้อน (heat work tool steel) H13 ความแข็งหลังการอบชุบด้วยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟอยู่ที่ 59 HRC

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอลูมิเนียม

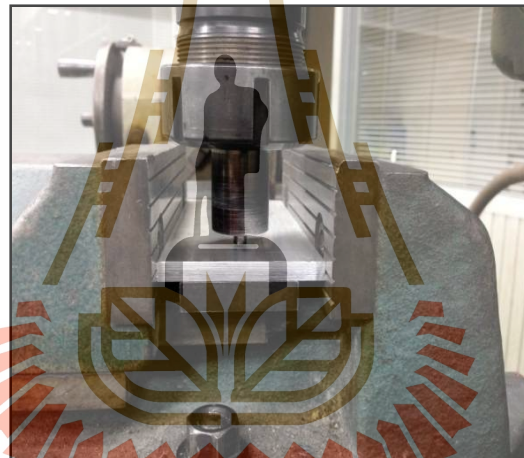
Grade	Al	Mg	Cr	Si	Mn	Cu	Ni
6063	98.0	0.416	0.0058	0.43	0.0445	0.0311	0.0086

3.3.2 การปั่นถนโลหะผสมอลูมิเนียม

การถนกระทำในลักษณะถนบนชิ้นงานแผ่นเดียว โดยใช้ความเร็วในการหมุนของหัวถนระหว่าง 450 ถึง 1120 รอบต่อนาที และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวถน ระหว่าง 28 ถึง 112 มิลลิเมตรต่อนาที การถนทำโดยการประยุกต์ใช้เครื่องกัดโลหะ (milling machine) เพื่อใช้ในการหมุนหัวถนจุ่มลงไปบนเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมและเคลื่อนที่ไปตามแนวถน ในลักษณะที่หัวถนถูกจับยึดกับชุดหมุนของเครื่องกัดโลหะ ที่อยู่ด้านบนของชิ้นงาน ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้ตามที่กำหนด จากนั้นทำการปรับแกน Z ของเครื่องเพื่อให้หัวถนจุ่มลงไปบนเนื้อชิ้นงานจนกระทั่งบ่าของหัวถน สัมผัสกับผิวของชิ้นงาน จากนั้นทำการปรับให้แกน X ของเครื่องเคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนดไว้ เมื่อถึงปลายชิ้นงานทำการหยุดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และเคลื่อนที่แกน Z ขึ้นเพื่อยกหัวถนออกจากชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ชิ้นงานถูกยึดด้วยปากกาจับชิ้นงานที่วางอยู่บนฐานของเครื่องกัดโลหะ ได้ชิ้นงานวางแผ่นเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น (backing plate) กว้าง 45 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ไว้เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการทะลุและยังทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากชิ้นงานด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.3



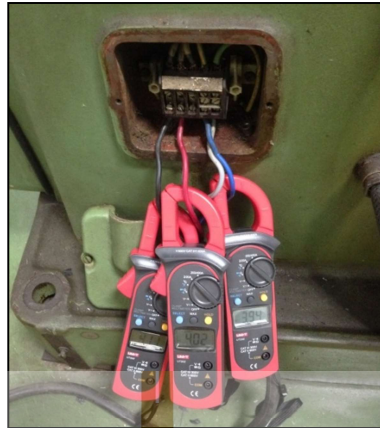
รูปที่ 3.2 กระบวนการกวนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



รูปที่ 3.3 การจับยึดชิ้นงานก่อนทำการกวน

3.3.3 การวัดกระแสไฟฟ้า

ในขณะที่ทำการกวนโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยกระบวนการเสียดทานแบบกวนทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่เข้าเครื่องกัดโลหะ ด้วยแคลมป์มิเตอร์รุ่น Clamp Meter UNI-T UT202 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการกวนแบ่งการวัดออกเป็นสองแบบคือ 1) วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการเดินเครื่องเปล่าด้วยความเร็วรอบในการหมุนและด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนที่กำหนดไว้ โดยที่ไม่ใส่ชิ้นงานเข้าไปในระบบ และ 2) วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการกวนโดยใส่ชิ้นงานและทำการกวนจริง



รูปที่ 3.4 การตรวจวัดกระแสในขณะทำการถนอม

3.3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ในการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของรอยถนอมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบถนอม
ทำการตัดชิ้นงานตามขวางรอยถนอมห่างจากปลายรอยถนอมเป็นระยะ 35 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่
3.5



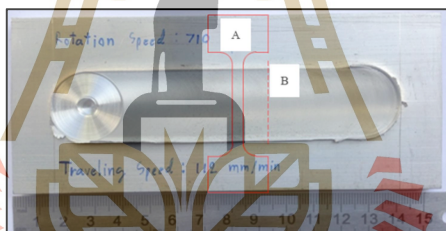
รูปที่ 3.5 บริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้าง

หลังจากนั้นขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 ถึง 4000 แล้วตามด้วยขัดผงเพชรบนผ้าสักหลาด
และทำการกัดชิ้นงาน (Etching) ในการตรวจสอบขนาดบ่อถนอม ใช้สารกัดชิ้นรอย tucker's ซึ่งมี
ส่วนผสมประกอบด้วย HCl 45 ml, HNO₃ 15 ml, HF 15 ml, H₂O 25 ml และในการตรวจสอบ

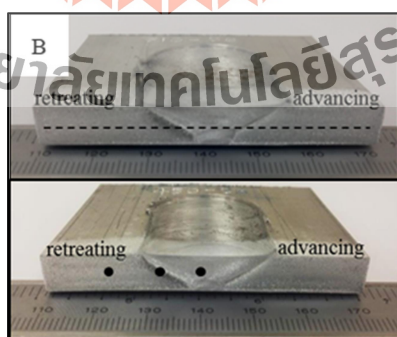
ขนาดของเกรนในรอยกวานใช้สารกัดขึ้นรอย weck's ซึ่งมีส่วนผสมประกอบด้วย H_2O 100 ml, $KMnO_4$ 4g, $NaOH$ 1 g หลังจากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OLYMPUS BX51M)

3.3.5 การทดสอบสมบัติทางกล

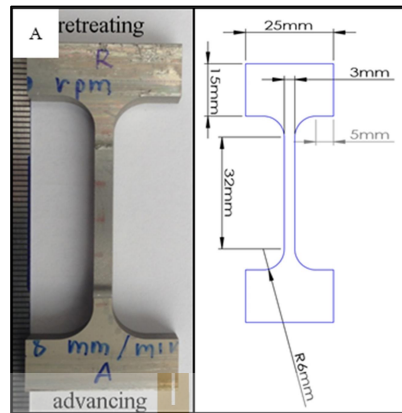
การทดสอบทางกลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1)การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ซึ่งมีการทดสอบสองลักษณะ คือ 1.1)การทดสอบความแข็งของรอยกวานตามแนวภาคตัดขวางรอยกวาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 1.2)การทดสอบความแข็งเฉพาะบริเวณ 3 จุดดังแสดงในรูป 3.7 โดยเครื่องทดสอบ micro vickers hardness รุ่น FM800 ยี่ห้อ FUTURE-TECH และ 2) ทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test) โดยใช้เครื่องทดสอบ instron universal testing machine รุ่น 5582 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงถูกตัดในแนวขวางรอยกวาน (transvers direction) มีรูปทรงแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 บริเวณที่ทดสอบความแข็งและความแข็งแรงดึง



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานทดสอบความแข็งเฉพาะบริเวณ



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

3.4 ผลการทดลอง

3.4.1 กระแสไฟฟ้าและพลังงาน

ผลการวัดกระแสไฟฟ้าระหว่างการกวนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสมอลูมิเนียมโดยใช้แคลมป์มิเตอร์ได้ผลการวัดดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.9 เส้นประแสดงกระแสไฟฟ้าระหว่างการเดินเครื่องกวนเปล่า เส้นทึบแสดงกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการกวนโลหะผสมอลูมิเนียม ขณะเดินเครื่องเปล่ากระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ตลอดเวลาการเคลื่อนที่ซึ่งหมายถึงอัตราการจ่ายพลังงานลงชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการกวน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในขณะที่เดินเครื่องหัวกวนและแท่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่โดยไม่ได้รับการกระทบทางกลที่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดทำให้กระแสไฟฟ้าของเครื่องกัดโลหะ คงที่ขณะที่กราฟเส้นทึบซึ่งแสดงกระแสไฟฟ้าจากการกวนจริงในช่วงแรกกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำและเพิ่มขึ้นด้วยอัตราต่ำและค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงนี้ต่ำกว่าการเดินเครื่องเปล่า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าใช้ไปกับการหมุนของหัวกวนเพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มการเคลื่อนที่ของหัวกวนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ช่วงที่สองกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดซึ่งเป็นเวลาที่หัวกวนสัมผัสไปที่ชิ้นงานและถูกกดลงจนถึงจุดต่ำสุด หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อหัวกวนหมุนอยู่กับที่ ช่วงที่สามกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่หลังจากที่หัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ไปได้ระยะหนึ่งจนสุดแนวกวน ช่วงที่สี่เมื่อยกหัวกวนขึ้นและก่อนการปิดการทำงานของเครื่องกัดโลหะกระแสไฟฟ้าลดลงเป็นลำดับ

จากลักษณะกราฟที่ได้จากการกวนจริงเราอาจอนุมานได้ว่าหลังจากหัวกวนเคลื่อนที่ได้ระยะหนึ่งพฤติกรรมพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนค่อนข้างเป็น quasi static steady state ซึ่งเป็นสภาพ

ที่ทำให้บ่อควมมีลักษณะคล้ายกัน ไม่ว่าตัดจากหน้าตัดไหนบนชิ้นงานควม ทำให้ผู้วิจัยเลือกช่วงดังกล่าวมาหาค่าพลังงานที่สูญเสียชิ้นงานควมขณะเกิดการควม โดยผู้วิจัยได้อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงาน ที่กล่าวว่าพลังงานไม้อาจถูกสร้างขึ้นหรือทำลายได้ พลังงานแค่เปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งเท่านั้น ในการทดลองนี้พลังงานไฟฟ้าที่วัดจากกระแสไฟฟ้าเข้าเครื่องกัดโลหะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานในรูปต่างๆ ดังสมการ 3.1

$$E_I = E_{\text{workpiece}} + E_{\text{ground}} + E_{\text{lose}} \quad (3.1)$$

เมื่อพลังงานขาเข้า (E_I) มีค่าเท่ากับพลังงานที่สูญเสียชิ้นงานควม ($E_{\text{workpiece}}$) พลังงานที่เครื่องกัดโลหะใช้ขึ้นตำ (E_{ground}) พลังงานที่สูญเสียไป (E_{lose}) ในรูปต่างๆ เช่น ความร้อนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของเครื่องจักรหรือสูญเสียไปกับอุปกรณ์ของเครื่องจักรและอื่นๆ และเพื่อประเมินหาพลังงานที่สูญเสียชิ้นงานควมผู้วิจัยจึงต้องประเมินค่าพลังงานขึ้นตำที่เครื่องกัดโลหะ ต้องการและพลังงานที่เกิดการสูญเสียทั้งหมดจากพลังงานการเดินเครื่องเปล่า ซึ่งสมมติให้ $E_{\text{lose}} + E_{\text{ground}}$ ของทั้งสองกรณีการควมเท่ากัน เมื่อนำค่าพลังงานทั้งสองมาหักลบกันทำให้ได้พลังงานที่สูญเสียชิ้นงานควม ดังสมการที่ 3.2

$$E_{I(\text{load})} - E_{I(\text{free load})} = E_{\text{workpiece}} \quad (3.2)$$

ในการคำนวณค่าพลังงานจากค่ากระแสไฟฟ้าผู้วิจัยได้ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณพลังงานเข้าสู่เครื่องกัดโลหะ จากกระแสไฟฟ้า ดังนี้

$$E_{@1m} = \frac{V \int_0^{\text{end}} \Delta I dt}{t_{\text{total}}} \times t_{@1m} \quad (3.3)$$

เมื่อ $E_{@1m}$ = พลังงานควมในระยะทาง 1 เมตร

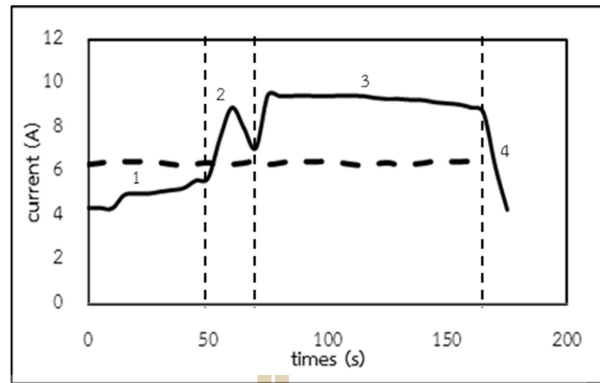
$t_{@1m}$ = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ 1 เมตร

t_{total} = เวลาทั้งหมด

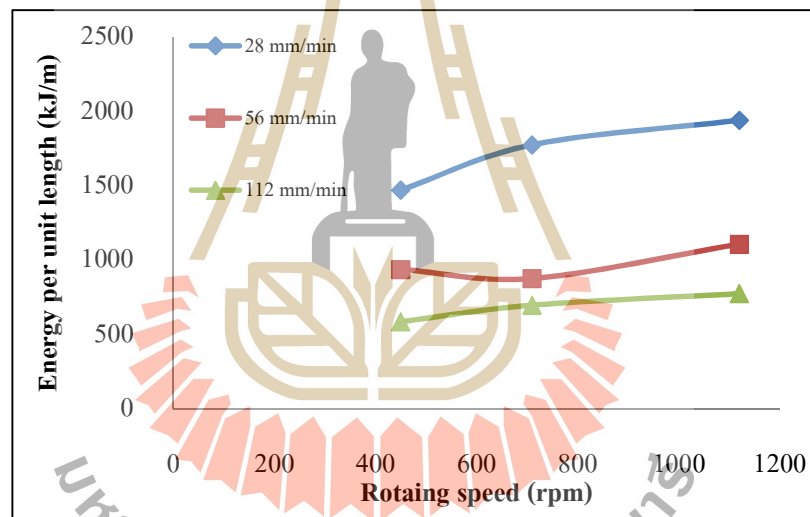
ΔI = ผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการควมสองกรณี

V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากผลคำนวณพลังงานที่สูญเสียชิ้นงานควมต่อระยะทางค้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11

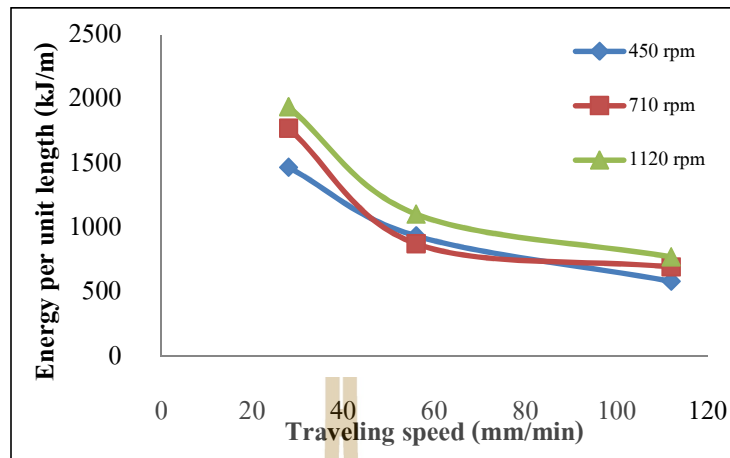


รูปที่ 3.9 ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการควนกรณีการควนด้วย $\omega = 1120$ rpm,
 $V = 56$ mm/min



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการหมุนกับพลังงาน

โดยรูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางกับความเร็วรอบในการหมุน รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน เมื่อพิจารณารูปที่ 3.10 และ 3.11 พบว่าความเร็วในการหมุนของหัวกวนที่เพิ่มขึ้นมีผลให้พลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานระหว่างการควน เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนต่ำลงพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการควนกับพลังงาน

จากสมการพลังค์ความร้อนในงานควนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบควนของ H Schmidt et al. [6] พบว่าพลังค์ความร้อนจากหัวควนลงสู่ชิ้นงานควนสามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$q_m = \frac{2}{3} \pi \omega \mu P (R_{shoulder}^2 + 3R_{probe}^2 + H_{probe}) \quad (3.4)$$

เมื่อ ω = ความเร็วในการหมุนของหัวควน (รอบต่อนาที)

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

P = แรงกดของหัวควน (นิวตัน)

$R_{shoulder}$ = รัศมีขาคของหัวควน (มิลลิเมตร)

R_{probe} = รัศมีหัวควน (มิลลิเมตร)

H_{probe} = ความสูงของหัวควน (มิลลิเมตร)

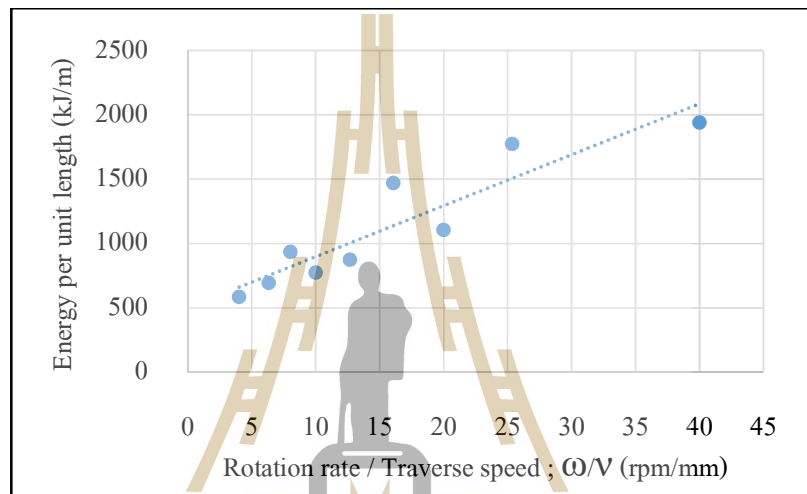
แต่ด้วยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้ค่าพลังงานในรูปของพลังงานลงสู่ชิ้นงานควนต่อระยะทาง เพื่อให้สมการของ H Schmidt มีความสอดคล้องกับงานวิจัย สมการพลังค์ความร้อนดังกล่าวต้องถูกแปลงโดยคูณด้วย $1/V$ ซึ่ง V แทนความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวควน และได้สมการที่ (5)

$$q_m = \frac{2\pi\mu P \omega}{3V} (A_{tool}) \quad (3.5)$$

โดย

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

จากสมการพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางมีดังนี้ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน (V) ความเร็วในการหมุนของหัวกวน (ω) สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) และแรงกดของหัวกวน (P)

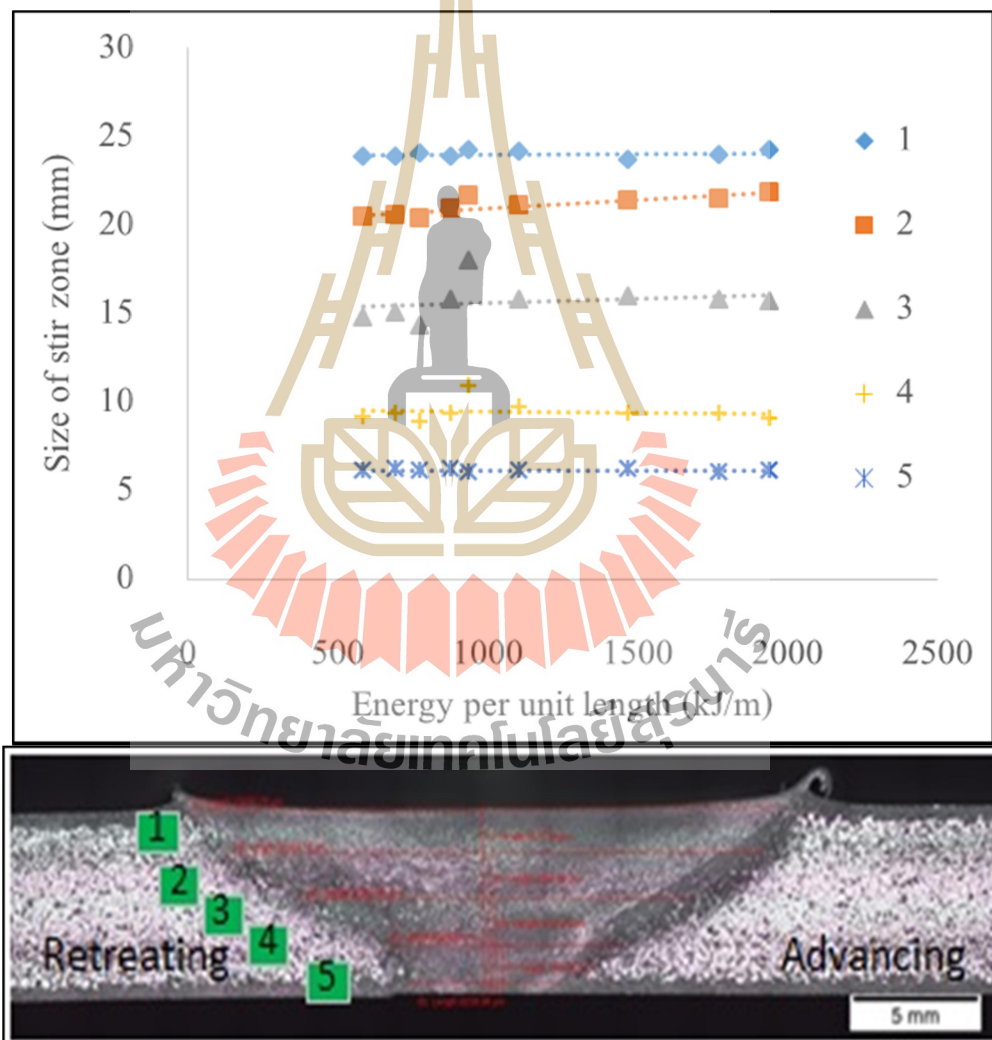


รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวน/ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนกับพลังงาน

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนของความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน (ω/v) กับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางดังแสดงในรูปที่ 3.12 พบว่ากราฟให้ความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเส้นตรง หมายความว่าเมื่อ ω/v เพิ่มขึ้นพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกัน ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่าไม่ว่าพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อความยาวมากแค่ไหนก็ตามค่า μP หรือ ค่าความเค้นเฉือน η ผิวสัมผัสหัวกวนกับชิ้นงานไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานในการศึกษาเพราะค่าความชันของกราฟเป็นค่าคงที่ จึงสรุปได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยยะสำคัญต่อพลังงานความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง ในช่วงสภาวะการกวนในการศึกษานี้ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนเท่านั้น

3.4.2 ขนาดของบ่อกวน

ขนาดบ่อกวนในการศึกษานี้ คือ บริเวณที่พบลักษณะความแตกต่างของโครงสร้างหลังการกัดขึ้นรอยด้วยน้ำยากัดกรดเพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคดังแสดงในรูปที่ 3.13 ด้านล่าง ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่โครงสร้างของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการกวนและส่วนใหญ่เกิดการตกผลึกใหม่ให้เกรนขนาดเล็ก และเมื่อนำขนาดของบ่อกวนตามแนวต่างๆ ของภาคตัดขวางชิ้นงานกวนดังกล่าวมาสร้างความสัมพันธ์กับค่าพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.13

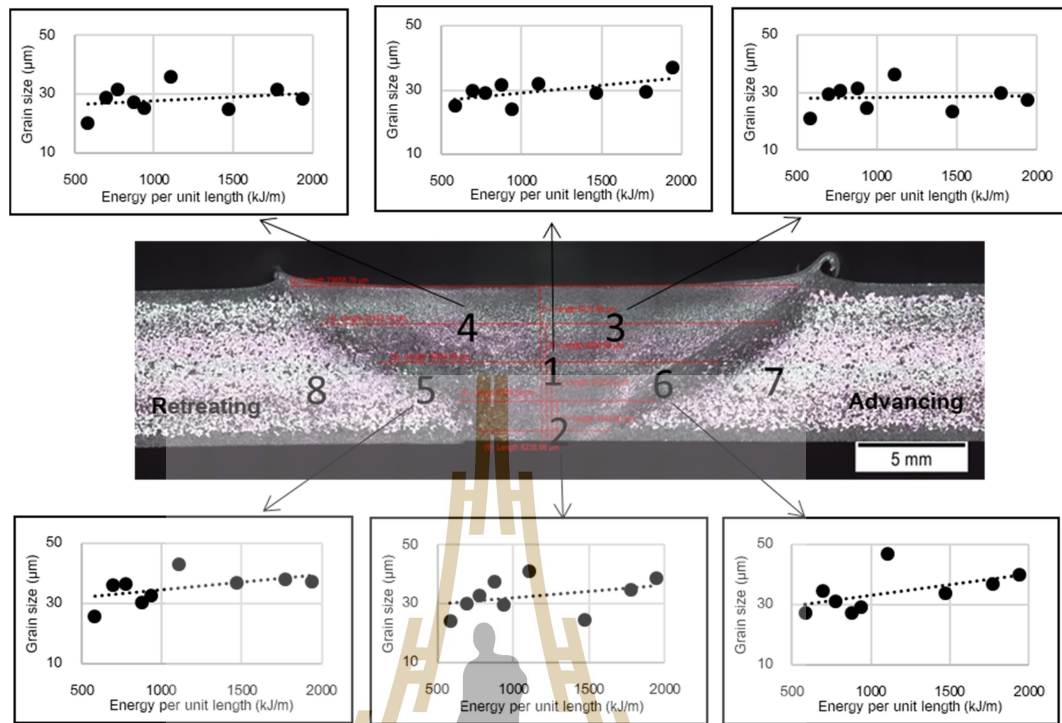


รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ลงสู่รอยกวนกับขนาดบ่อกวน

จากรูปที่ 3.11 พบว่าเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานกวนเพิ่มขึ้นขนาดความกว้างของบ่อกวนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละตำแหน่งในทิศทางความหนาไม่ว่าเป็นบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงานกับบ่าหัวกวนด้านบนสุด หรือบริเวณกลางชิ้นงานรวมถึงด้านล่างของบ่อกวน ยกเว้นบริเวณแนวการวัดที่ 2 ซึ่งเป็นบริเวณใต้บ่าหัวกวนลงมาประมาณ 1/4 ของความหนาชิ้นงาน ขนาดของบ่อกวนกว้างขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวได้รับทั้งพลังงานความร้อนที่เกิดจากบ่าหัวกวนและแรงเฉือน เมื่อพลังงานความร้อนลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมบริเวณดังกล่าวเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจากแรงเฉือนส่งผลให้บ่อกวนกว้างขึ้น แต่ช่วยในการศึกษาที่เราพบว่าค่า μP หรือ ค่าความเค้นเฉือน σ ผิวสัมผัสหัวกวนกับชิ้นงาน ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความเค้นเฉือน σ ผิวสัมผัสหัวกวนกับชิ้นงาน มีความสัมพันธ์กับแรงในการกวนเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมในบ่อกวน เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการกวนอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมการเสียดรูปอย่างรุนแรงในทุกสภาวะการกวนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และขนาดของบริเวณที่เกิดการเสียดรูปอย่างรุนแรงและตกผลึกใหม่นี้ก็ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญด้วย ส่งผลให้ขนาดความกว้างของบ่อกวนไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงาน อนึ่งในแนวการวัดความกว้างบ่อกวนแนวที่ 2 ที่ขนาดบ่อกวนกว้างขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางเพิ่มขึ้น น่าจะเกิดจากการที่ความเค้นเฉือน σ ผิวด้านบนของบ่อกวนใกล้เคียงกันแต่ด้วยภายในบ่อกวนมีการอ่อนตัวของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางเพิ่มขึ้นทำให้ σ ความลึกใต้ผิวสัมผัสของชิ้นงานกับหัวกวนสามารถเกิดการขยายตัวเล็กน้อยของบริเวณที่มีการกวนที่รุนแรงได้

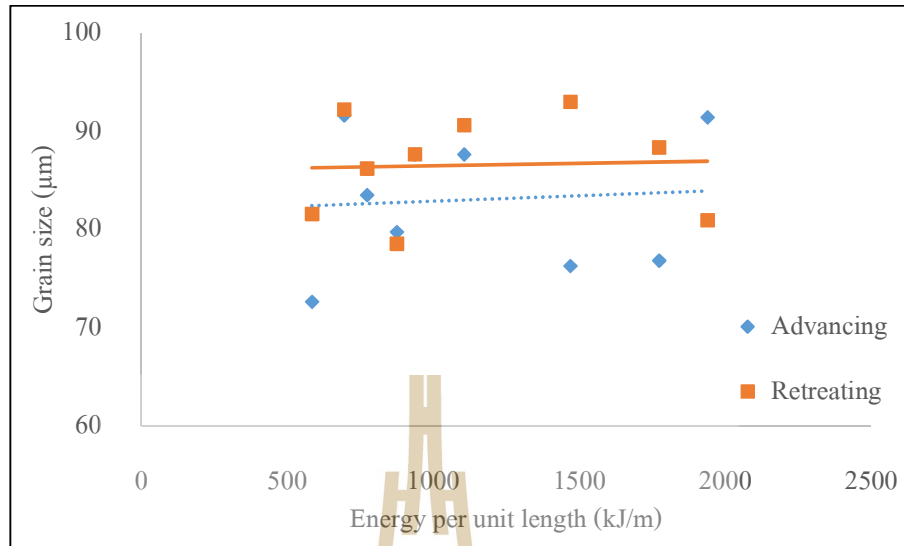
3.4.3 ขนาดเกรน

การตรวจวัดขนาดของเกรนแบ่งออกเป็น 8 บริเวณ โดยวัดภายในบ่อกวน 6 บริเวณ ได้แก่ด้าน retreating 2 บริเวณ (ตำแหน่งที่ 4 และ 5) ด้าน advancing 2 บริเวณ (ตำแหน่งที่ 3 และ 6) ด้านล่าง 1 บริเวณ (ตำแหน่งที่ 2) และกลางชิ้นงาน 1 บริเวณ (ตำแหน่งที่ 1) และนอกบ่อกวนอีก 2 บริเวณ (ตำแหน่งที่ 7 และ 8) โดยวัดห่างจากบ่อกวนเป็นระยะ 4 ทั้งนี้บริเวณขอบบ่อกวนไม่สามารถวัดขนาดเกรนได้เนื่องจากเกรนเกิดการเสียดรูปอย่างรุนแรงมีลักษณะยึดยาวตามความเค้นเฉือนที่ได้รับ (distorted grains) และมีขนาดเล็กลงมาก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนในบ่อกวนกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.14



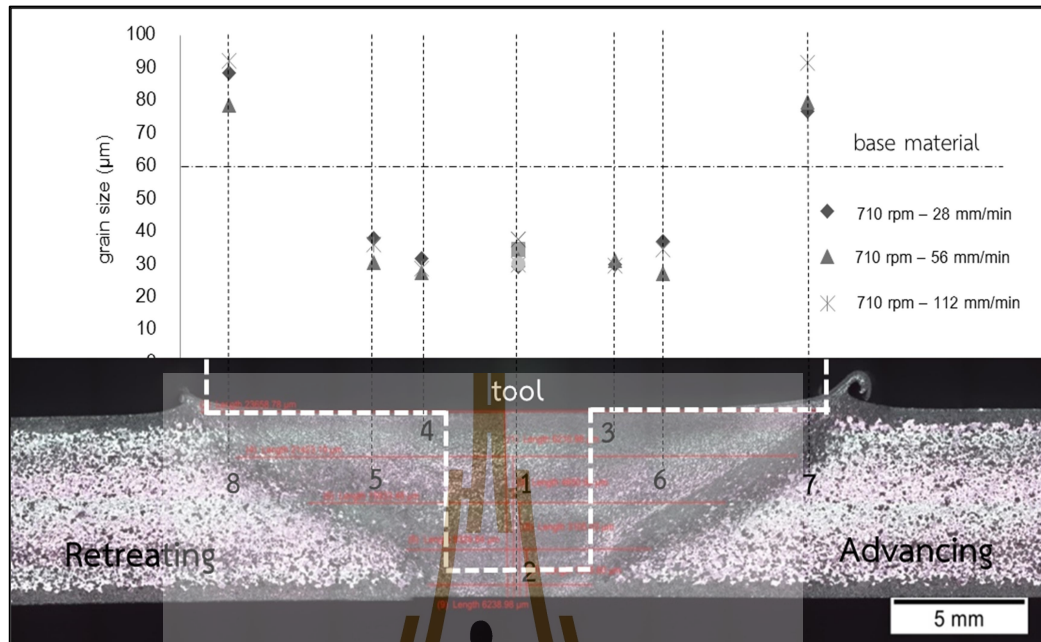
รูปที่ 3.14 ขนาดเกรน ณ บริเวณต่างๆในบ่อถั่วเปรียบเทียบกับพลังงาน

พบว่าขนาดของเกรนในบ่อถั่วทุกบริเวณมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น และเกรนที่พบยังมีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนเดิมของชิ้นงาน โลหะผสมอลูมิเนียมเริ่มต้นเนื่องจากเกิดการตกผลึกใหม่ โดยเนื้อโลหะในบ่อถั่วซึ่งได้รับความเค้นเนื่องจากการถั่วด้วยแรงทางกลจึงทำให้เกิดการเสียรูป ขณะเดียวกันก็ได้รับพลังงานความร้อนจากแรงเสียดทานและมีอุณหภูมิสูงพอที่ส่งผลให้เกิดการตกผลึกใหม่ ทำให้ขนาดเกรนบริเวณดังกล่าวมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับขนาดเกรนเริ่มต้นของชิ้นงาน แต่ด้วยระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้นระหว่างหัวถั่วกับชิ้นงานไม่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะดังผลที่แสดงก่อนหน้านี้นี้ ดังนั้นขนาดเกรนซึ่งปกติขึ้นกับระดับการเสียรูปและระดับของความร้อนนั้นจึงขึ้นกับปัจจัยด้านความร้อนเป็นหลักเพียงอย่างเดียว ทำให้ ณ สภาวะการถั่วที่พลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางที่สูงขึ้นขนาดเกรนจึงโตกว่าที่ระดับพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางที่น้อย



รูปที่ 3.15 ขนาดเกรนบริเวณนอกบ่อควนกับพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง

สำหรับขนาดเกรนนอกบ่อควนที่ยังอยู่ในบริเวณที่เกรนมีการเสีรูปร่างแบบถาวรและมีการตกผลึกใหม่บางส่วน (4 มิลลิเมตรจากขอบบ่อควน) ขนาดเกรนโตขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.15 ขณะที่ถ้าทำการเปรียบเทียบขนาดเกรนนอกบ่อควนกับขนาดเกรนในบ่อควนและขนาดเกรนเริ่มต้น พบว่าขนาดเกรนบริเวณนอกบ่อควนมีขนาดใหญ่กว่าเกรนบริเวณในบ่อควน และขนาดเกรนเริ่มต้น โดยขนาดเกรนบริเวณนอกบ่อควนที่พบมีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 72 ถึง 95 ไมโครเมตร ขณะที่ขนาดเกรนเริ่มต้นของโลหะผสมอลูมิเนียมมีขนาด 60 ไมโครเมตรโดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เนื่องจากบริเวณดังกล่าวได้รับผลกระทบจากความร้อนแต่ด้วยการเสีรูปร่างไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ เกิดเฉพาะการโตของเกรนและแสดงให้เห็นว่าเกรนมีการเสีรูปร่างเล็กน้อย นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าขนาดเกรนนอกบ่อควนด้าน retreating มีขนาดใหญ่กว่าเกรนนอกบ่อควนด้าน advancing เล็กน้อยและเกิดการเสีรูปร่างรุนแรงด้าน advancing มากกว่า retreating ดังรูปที่ 3.15 อีกด้วย

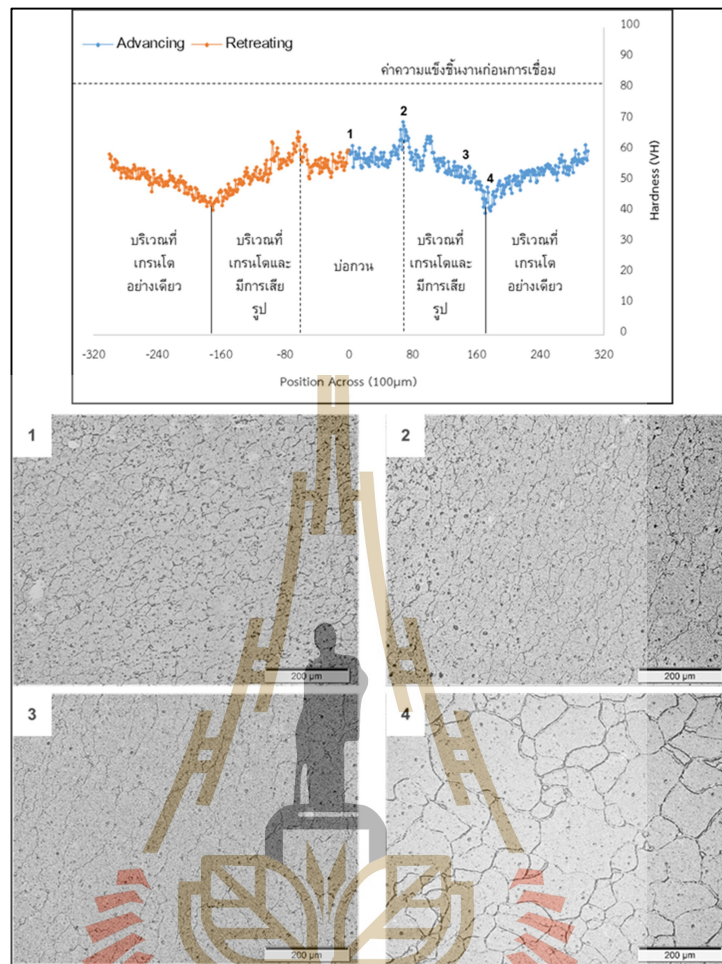


รูปที่ 3.16 ขนาดเกรนบริเวณต่างๆ ของรอยกวาดจากสภาวะการกวาดโดยใช้ความเร็วในการหมุนของหัวกวาด $\omega = 710$ rpm และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวาด $V = 28, 56, 112$ mm/min

3.4.4 สมบัติทางกล

3.4.4.1 การทดสอบความแข็ง

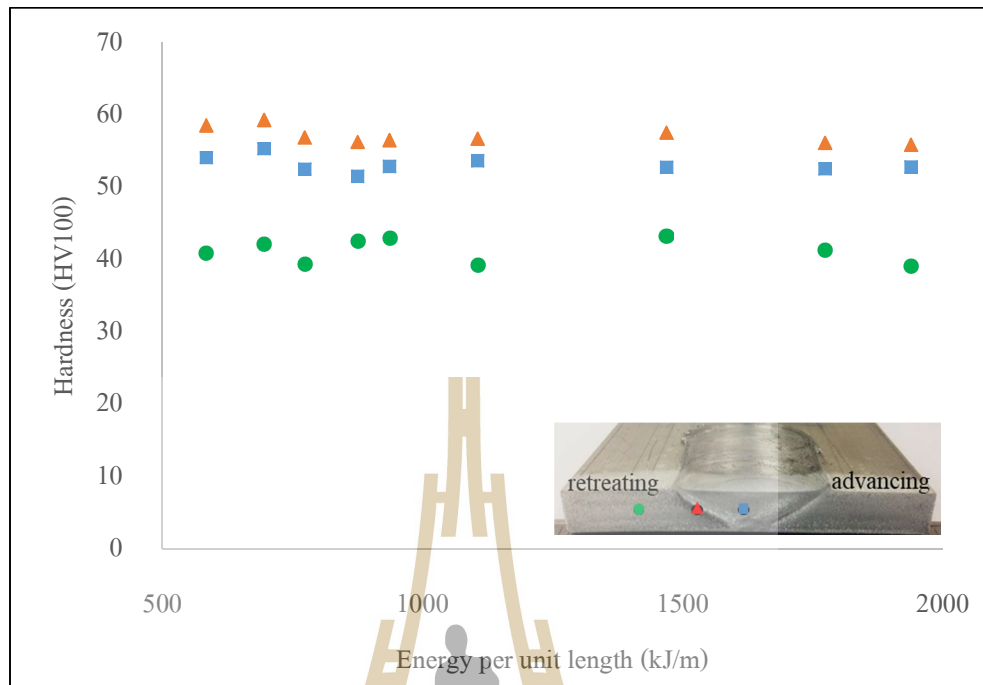
เนื่องจากโลหะผสมอลูมิเนียมเกรดที่นำมาศึกษานั้นผ่านกระบวนการทางความร้อนจากนั้นทำการขึ้นรูปเย็นและบ่มเทียมนำให้ชิ้นงานก่อนการกวาดมีความแข็งแรงขึ้นจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงอย่างน้อย 3 กลไกได้แก่ 1) การเพิ่มขอบเกรน 2) การเพิ่มความเครียดและ 3) การตกตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมมาทำการกวาดทำให้ความแข็งของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากอิทธิพลของกลไกทั้ง 3 ประเภท ดังแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่าความแข็งในแนวตัดขวางชิ้นงานกวาดดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การกระจายตัวของค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีการกวนด้วยความเร็วรอบในการหมุน 1120 rpm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 56 mm/min

โดยความแข็งตามแนวกลางของรอยกวน พบว่าบริเวณบ่อกวนค่าความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมมีค่าใกล้เคียงกันทั้งบ่อกวน โดยค่าความแข็งที่วัดได้นั้นมีต่ำกว่าค่าความแข็งของชิ้นงานเริ่มต้นก่อนการกวนค่อนข้างมาก และค่าความแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียมในด้าน advancing คล้ายจะสูงกว่าด้าน retreat เล็กน้อย ส่วนบริเวณขอบของบ่อกวนนั้นค่าความแข็งสูงขึ้นจากบริเวณภายในบ่อกวนอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับบริเวณถัดจากขอบบ่อกวนออกมาค่าความแข็งของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำสุดที่ระยะห่างจากขอบบ่อกวนประมาณ 8 มิลลิเมตร จากนั้นค่าความแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียมตามแนวขวางรอยกวนเพิ่มขึ้นตามระยะห่างออกจากบ่อกวนที่เพิ่มมากขึ้นแต่ยังคงมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าความแข็งชิ้นงานเริ่มต้น

จากลักษณะของการกระจายตัวของความแข็งบริเวณรอยกวน และลักษณะโครงสร้างโครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับตำแหน่งที่วัดความแข็งแสดงในรูปที่ 3.17 สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งตามแนวขวางรอยกวนได้ดังนี้ ชิ้นงานกวนในการศึกษานี้พบการโตของเกรนนอกบ่อกวนทั้งหมด ทำให้กล่าวได้ว่าอุณหภูมิของชิ้นงานทั้งชิ้นขณะทำการกวนต้องมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของโลหะผสมอลูมิเนียม คือ สูงกว่า 0.4-0.5 เท่าของอุณหภูมิหลอมเหลวในหน่วยสัมบูรณ์ของโลหะผสมอลูมิเนียมเกรดนั้น ดังนั้นความร้อนจากการกวนอาจส่งผลทำให้โลหะผสมอลูมิเนียมทุกบริเวณมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากจนทำให้ ตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะขนาดเล็กเกิดการ โตและ ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับ โครงผลึกเดิม (non-coherent) หรือเกิดการ บ่มเกิน over aging ขึ้นหรือไม่ก็เกิดการละลายกลับของตะกอนของแข็งของสารประกอบเชิงโลหะ กลับเข้าสู่เนื้อ โลหะผสมอลูมิเนียมส่งผลให้ความแข็งและความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงอย่างมาก ดังนั้นค่าความแข็งของชิ้นงานกวนในการศึกษานี้จึงขึ้นกับกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการเพิ่มของขอบเกรนและการเพิ่มความเครียด เป็นหลักเท่านั้น เมื่อพิจารณาเป็นบริเวณ บริเวณ บ่อกวน และ นอกบ่อกวนที่ค่าความแข็งที่วัด ได้ยังคงลดลงตามระยะห่างจากกลางบ่อกวนดังแสดงในรูปที่ 3.17 การตกผลึกใหม่ของเกรนและการเสีรูปร่างของเกรนส่งผลให้ความแข็งแรง เนื่องจากกลไก การเพิ่มขอบเกรน และ การเพิ่มความเครียดมีบทบาทกับการกระจายตัวของค่าความแข็งใน โลหะผสมอลูมิเนียมอย่างมาก และระดับของความแข็งที่เพิ่มขึ้นขึ้นกับระดับของขนาดเกรนที่เล็กลงและ ลักษณะการยึดตัวที่เพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณภายในบ่อกวนค่าความแข็งที่วัด ได้จึงใกล้เคียงกันทั้งบ่อ กวนเพราะเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.14 ลักษณะการเสีรูปร่างและยึดตัวของเกรนไม่ ต่างกันมาก แต่ ณ บริเวณขอบบ่อกวนเกิดการยึดตัวของเกรนค่อนข้างมากดังรูปที่ 3.17 ความแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียมบริเวณนี้จึงเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มความเครียดเป็นหลัก ส่วนบริเวณที่ห่างจาก ขอบบ่อกวนออกไปจนถึงจุดต่ำสุดของค่าความแข็งที่วัด ได้ในรูปที่ 3.17 นั้นความแข็งลดลงเพราะ บริเวณการเสีรูปร่างของเกรนค่อยๆลดลงทำให้บทบาทของกลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยการเพิ่ม ความเครียดลดลงตามระยะห่างจากขอบบ่อกวนที่มากขึ้นทำให้ความแข็งลดลงเรื่อยๆ และหลังจาก บริเวณที่มีความแข็งต่ำสุดแล้วไม่พบการเสีรูปร่างของเกรนพบแต่การ โตของเกรนเพียงอย่างเดียว และ การ โตของเกรนลดลงที่ระยะห่างจากขอบบ่อกวนมากขึ้น ทำให้ความแข็งชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามกลไก การเพิ่มของขอบเกรนเป็นหลัก

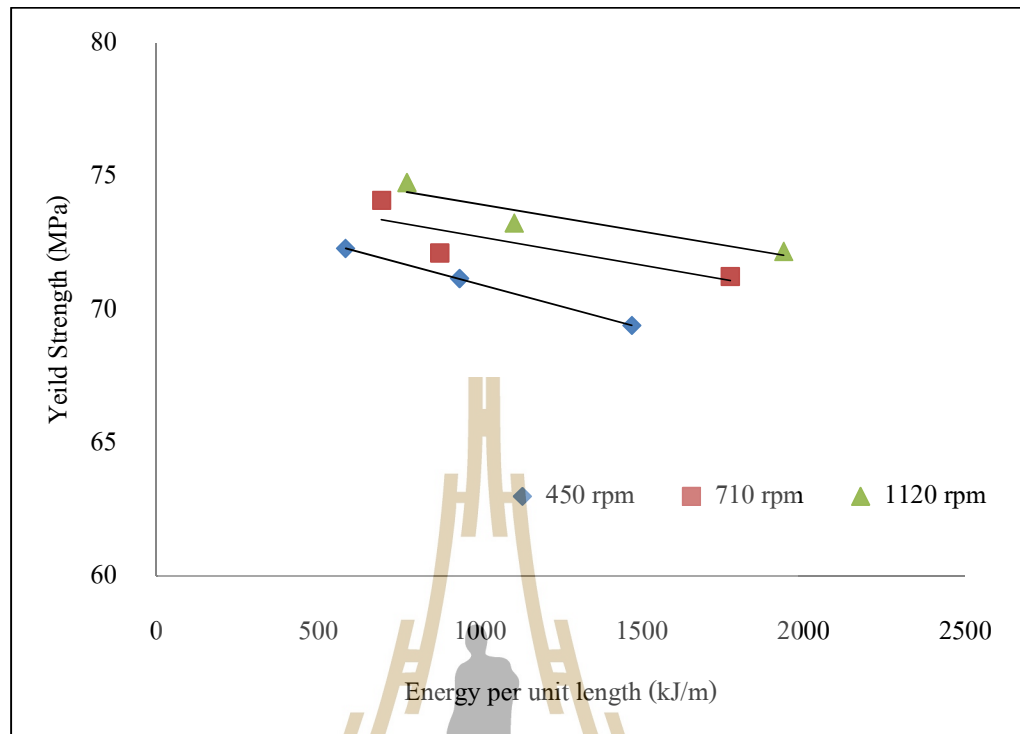


รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางกับความแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง ณ บริเวณกลางบ่อกวน ขอบของบ่อกวน และบริเวณนอกบ่อกวน ดังรูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าความแข็งบริเวณกลางบ่อกวนและขอบบ่อกวนมีการลดลงเล็กน้อยตามขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้น ส่วนบริเวณนอกบ่อกวนมีค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 อาจเนื่องมาจากการโตของเกรนที่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางในระยะห่างของบ่อกวนไม่มากนักจึงไม่พบความแตกต่างของความแข็งที่วัดได้

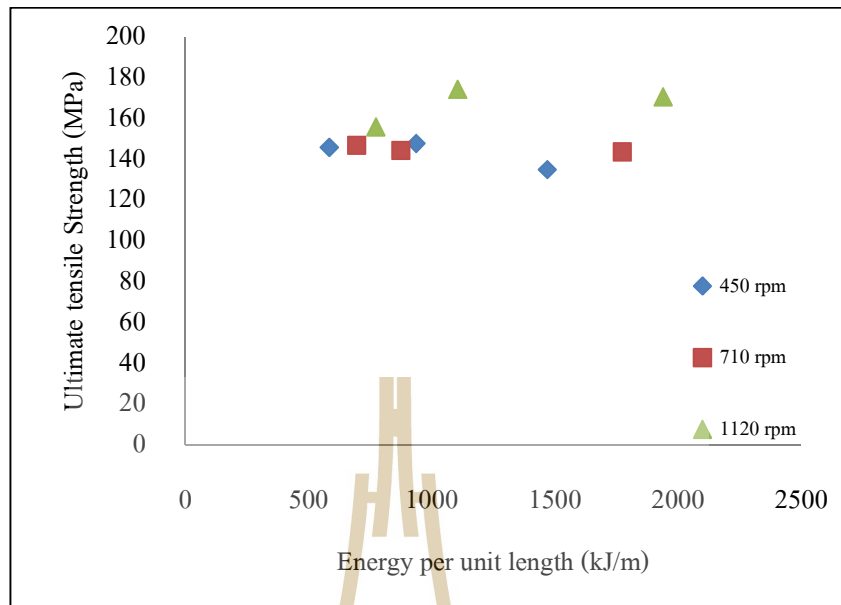
3.4.4.2 การทดสอบแรงดึง

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานกวนในสถานะต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบความเค้นจุดครากและความแข็งแรงดึงสูงสุดกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางที่สถานะต่างกัน พบว่าเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นความเค้นจุดครากลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่



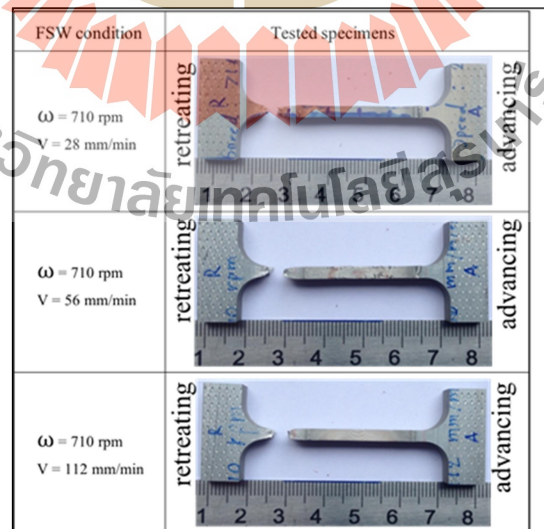
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของพลังงานกับความเค้นจุดคราก

ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่โตขึ้นเมื่อพลังงานลงสู่ชิ้นงานกวนต่อระยะทางเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ในสมการ Hall-Petch [7,8] ขณะที่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของพลังงานลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงสูงสุดพบว่าพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทางเพิ่มขึ้นความแข็งแรงดึงสูงสุดยังคงมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.20 อย่างไรก็ตามความแข็งแรงดึงของชิ้นงานกวนทุกสภาวะต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนการกวนทุกชิ้นที่เนื่องจากชิ้นงานกวนได้ผ่านการกวนซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อน และทางกล ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไป

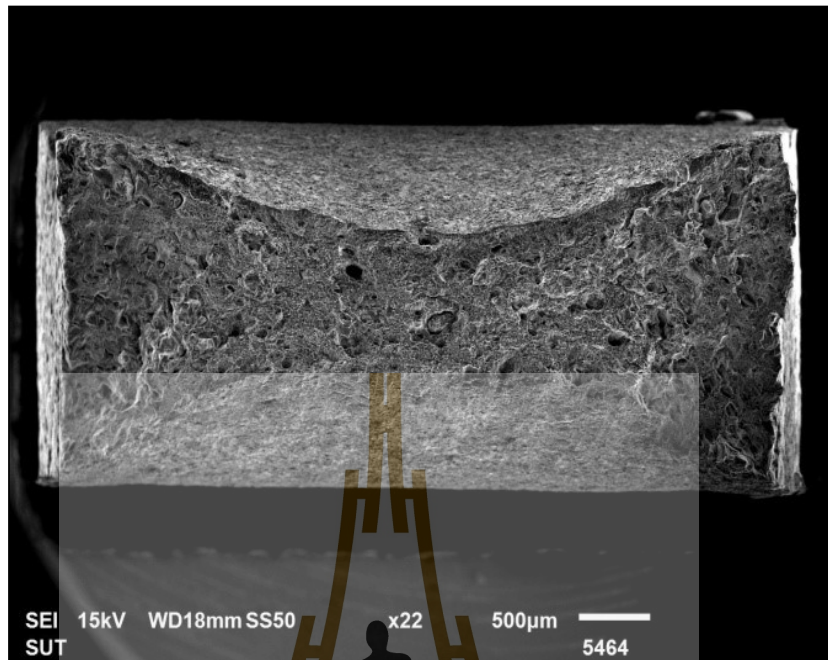


รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ของพลังงานกับความแข็งแรงดึง

สำหรับลักษณะการแตกหักของชิ้นงานกวนหลังการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าชิ้นงานกวนเกิดการแตกหัก ณ บริเวณนอกรอยกวนฝั่ง retreating ในทุกสภาวะการกวน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

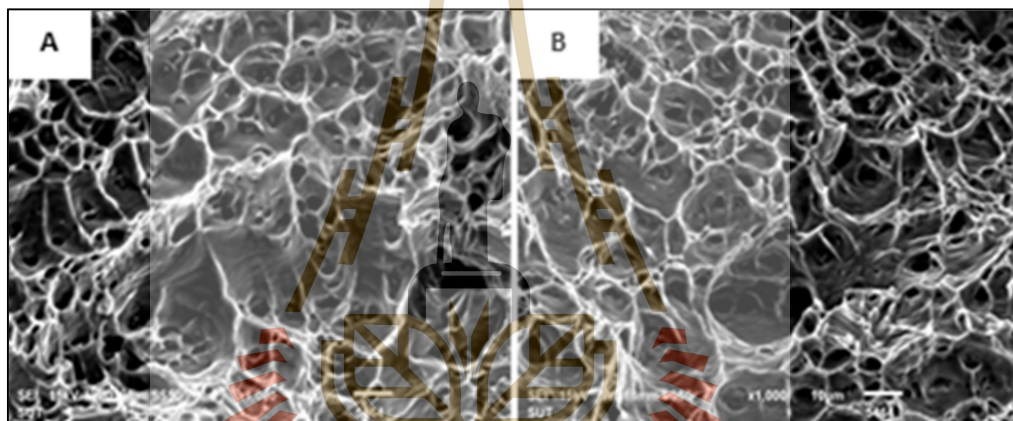


รูปที่ 3.22 รอยแตกหักของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการกวน



รูปที่ 3.23 รอยแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการกวน

จากลักษณะพื้นผิวรอยแตกรอยแตกชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนทอในรูปที่ 3.22 และ พื้นผิวรอยแตกในชิ้นงานทอโลหะผสมอลูมิเนียมในรูปที่ 3.23 เห็นได้ว่ารอยแตกหักที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทั้งสองแสดงการแตกแบบเหนียว พื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานทอเกิดการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดมากกว่าพื้นผิวรอยแตกของโลหะผสมอลูมิเนียมเริ่มต้น นอกจากนี้ขนาดของ dimple ที่พบในชิ้นงานทอยังละเอียดกว่าในชิ้นงานโลหะผสมอลูมิเนียมเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวัดขนาดเกรนนอกบ่อทอข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งขนาดของเกรนฝั่ง retreating มีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดเกรนฝั่ง advancing ทำให้ชิ้นงานด้าน retreating มีความแข็งแรงต่ำกว่าด้าน advancing จึงทำให้เกิดความเสียหายที่ตำแหน่งดังกล่าวในชิ้นงานทอซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าความแข็งต่ำ



รูปที่ 3.24 ภาพถ่าย SEM A) พื้นผิวรอยแตกของโลหะผสมอลูมิเนียมเริ่มต้น B) พื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานทอ

3.5 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

- 1) ปริมาณพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานทอต่อระยะทางเพิ่มขึ้น ไม่มีนัยยะสำคัญต่อขนาดของบ่อทอโดยรวม แต่ส่งผลต่อความกว้างบริเวณใต้บ่าหัวทอลงมาประมาณ 1/4 ของความหนาชิ้นงาน โดยที่ขนาดของบ่อทอมีความกว้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานต่อระยะทาง
- 2) พลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานทอต่อระยะทางที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดเกรนโตขึ้นเล็กน้อยในทุกบริเวณ ขนาดเกรนในบริเวณบ่อทอมีขนาดเล็กกว่าเกรนเริ่มต้น ในขณะที่เกรนนอกบ่อทอมีขนาดใหญ่กว่าเกรนเริ่มต้นและขนาดเกรนฝั่ง retreating โตกว่าเกรนฝั่ง advancing เล็กน้อย และ

3) สมบัติเชิงกลของชิ้นงานกวนโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A6063-T831 นี้ขึ้นกับปรากฏการณ์ทางความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการกวนซึ่งส่งผลให้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงที่ใช้เพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนการกวนเปลี่ยนไป และจากการศึกษานี้ชิ้นงานขณะทำการกวนได้รับอุณหภูมิสูงจนทำให้กลไกที่ควบคุมความแข็งแรงบริเวณรอยกวนเหลือเพียงสองกลไก คือ กลไกการเพิ่มขอบเกรน และ กลไกการเพิ่มความเครียด

3.6 รายการอ้างอิง

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B. Patent Application No.9125978.8 (December 1991).
- [2] B. Reinhold, K. Angermann, W. Krenkel (Ed.), Verbundwerkstoffe, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009, pp. 27–38.
- [3] M. Wahba, Y. Kawahito, S. Katayama, J. Mater. Process. Technol. 211 (2011)1166–1174.
- [4] Mishra, R.S. and Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005. 50(1-2): p. 1-78.
- [5] Nandan, R., T. DebRoy, and H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. Progress in Materials Science, 2008. 53(6): p. 980-1023.
- [6] H Schmidt, J Hattel, and J Wert. An analytical model for the heat generation in friction stir welding. MODELLING AND SIMULATION IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 12 (2004) 143–157.
- [7] Hall EO. Proc Phys Soc London B.1951;64:747.
- [8] Petch NJ. J Iron Steel Inst 165

บทที่ 4

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียม

A6063-T831 กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

(Friction Stir Spot Welding between Aluminum alloy

A6063-T831 and High Density Polyethylene)

4.1 บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันว่าการเชื่อมวัสดุต่างชนิด โดยเฉพาะ โลหะผสมอลูมิเนียมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นเรื่องยากเนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างวัสดุสองชนิดบริเวณรอยเชื่อม ดังนั้นกลไกการติดกันของเนื้อวัสดุจึงเป็นเพียงกลไกเดียวที่สามารถใช้ในการเชื่อมติดวัสดุสองชนิดได้ ด้วยเหตุนี้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดจึงถูกนำมาใช้เชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยผู้วิจัยคาดหวังว่าจะสามารถผลิตเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงยัดเข้าไปในหลุมโลหะผสมอลูมิเนียมเพื่อล็อกแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับแผ่นโลหะผสมอลูมิเนียมให้ติดกันได้ ในงานวิจัยผู้วิจัยได้เปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวน และความหนาผิวหน้าสัมผัสบริเวณต่อชน จากผลการทดลองพบว่าโลหะผสมอลูมิเนียม AA6063-T832 และแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสามารถเชื่อมติดกันด้วยกลไกการติดกันของเนื้อวัสดุได้สำเร็จ อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับน้ำหนักของรอยเชื่อมยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุเริ่มต้น ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของชิ้นงานเชื่อมในการศึกษานี้ คือ 213 นิวตัน นอกจากนี้ความสามารถในการรับน้ำหนักของรอยเชื่อมยังขึ้นอยู่กับความหนาของขอบในแนวรอยเชื่อมที่ทำการกลึงไส และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนลดลงที่ชิ้นงานเชื่อม

4.2 บทนำ

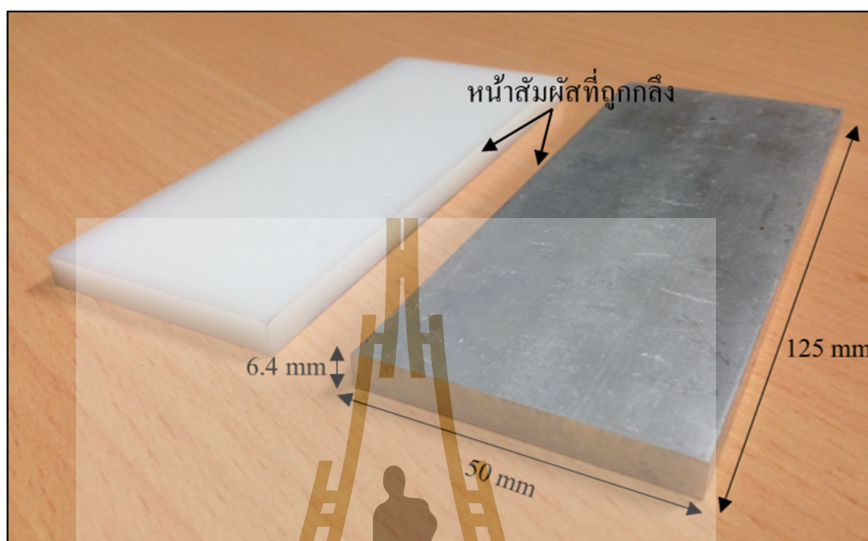
รถยนต์ไฟฟ้าได้รับการเสนอให้เป็นระบบการขนส่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดในอนาคต เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าปฏิเสธไม่ได้เลยว่าการลดน้ำหนักรวมของรถยนต์ไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุด แนวคิดในการใช้โครงสร้างที่ทำจากวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดถูกนำมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการในการลดน้ำหนักรวม และเมื่อมีการใช้วัสดุผสมเพื่อลดน้ำหนักโดยรวม กระบวนการเชื่อมวัสดุต่างชนิดจึงถูกนำมาใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมวัสดุที่เป็นพลาสติกกับโลหะ จากการค้นคว้าผู้วิจัยพบว่าการเชื่อมวัสดุที่ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างพลาสติกและโลหะคืองานวิจัยของ Katayama et al. [1] ที่ศึกษาการเชื่อมโลหะกับพลาสติกโดยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ หลังจากนั้นก็มีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะกับพลาสติกโดยการเชื่อมด้วยเลเซอร์ การเชื่อมด้วยคลื่นความถี่สูง และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานได้รับการศึกษา [2-8] อย่างไรก็ตามการเชื่อมติดของวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะกับพลาสติกสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยสองกลไกการเชื่อม 1) กลไกการเชื่อมติดด้วยปฏิกิริยา 2) กลไกการเชื่อมติดกันด้วยการยึดเกี่ยว จากงานวิจัยพลาสติกบางชนิดที่มีกลุ่มฟังก์ชัน เช่น กลุ่ม เอสเทอร์ จะสามารถทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของโลหะบางประเภท เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ส่งผลให้เกิดกลไกการเชื่อมติดด้วยปฏิกิริยา [9] อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมพลาสติกที่ไม่มีกลุ่มฟังก์ชัน เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน กับโลหะเป็นเรื่องยากที่จะเกิดการเชื่อมติดด้วยปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อเชื่อมพลาสติกที่ไม่มีกลุ่มฟังก์ชันกับโลหะ กลไกการเชื่อมติดกันด้วยการยึดเกี่ยว เป็นเพียงโอกาสเดียว และเป็นที่ยอมรับกันว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดก่อให้เกิดรอยเชื่อมที่มีการยึดเกี่ยวกันเนื่องจากลักษณะของกระบวนการเชื่อม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดเพื่อเชื่อมพลาสติกที่ไม่มีกลุ่มฟังก์ชัน ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับโลหะผสมอลูมิเนียม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมวัสดุที่แตกต่างกันโดยใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุด

4.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

4.3.1 วัสดุและหัวกวน

วัสดุที่ใช้ศึกษาในกระบวนการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างพลาสติกกับโลหะ คือแผ่นโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด AA6063 และแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษามีความหนา 6.4 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร สมบัติทางกลของ

วัสดุทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 4.1 และส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอลูมิเนียม แสดงใน ตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ขนาดของชิ้นงาน โลหะผสมอลูมิเนียมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้ในการศึกษา

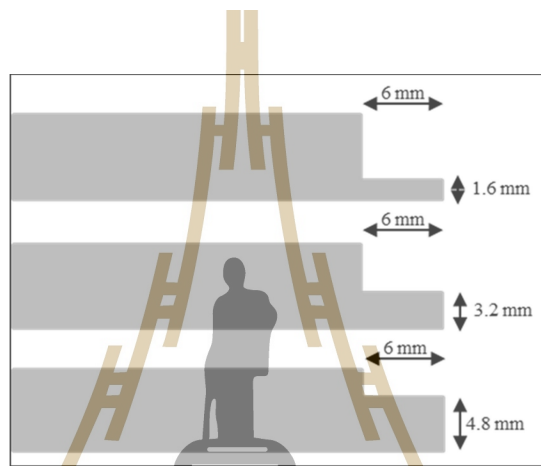
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม

สมบัติเชิงกล	อลูมิเนียม	HDPE
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.70	0.96
อุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	650	135
ความแข็งแรงดึง (MPa)	205.62	20.2
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	237	0.45
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$)	23.1	120

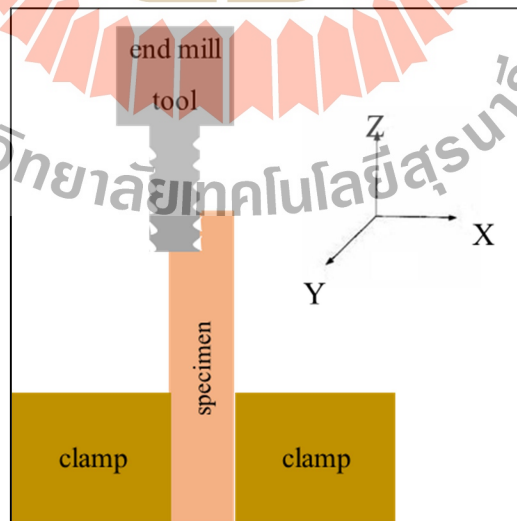
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอลูมิเนียม

Grade	Al	Mg	Cr	Si	Mn	Cu	Ni
6063	98.0	0.416	0.0058	0.43	0.0445	0.0311	0.0086

ก่อนการเชื่อมหน้าสัมผัสต่อชนของชิ้นงานทั้งสองดังแสดงในรูป 4.1 จะถูกกลึงไสให้มีลักษณะคล้ายตัวแอลดังแสดงในรูปที่ 4.2 การเตรียมชิ้นงานกระทำโดยจับยึดชิ้นงานกับฐานเครื่องกลึงผิวโลหะ จากนั้นใช้หัวเอ็นมิลกลึงไสชิ้นงาน โดยเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ให้มีระยะ 6 มิลลิเมตร และแกน X ให้มีระยะ 1.6, 3.2 และ 4.8 ตามลำดับหลังจากนั้นเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ตลอดความยาวของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมชิ้นงานข้างต้นช่วยส่งเสริมให้เกิดการยึดเกาะของชิ้นงาน ลักษณะของชิ้นงานภายหลังการกลึงไสแสดงในรูปที่ 4.2

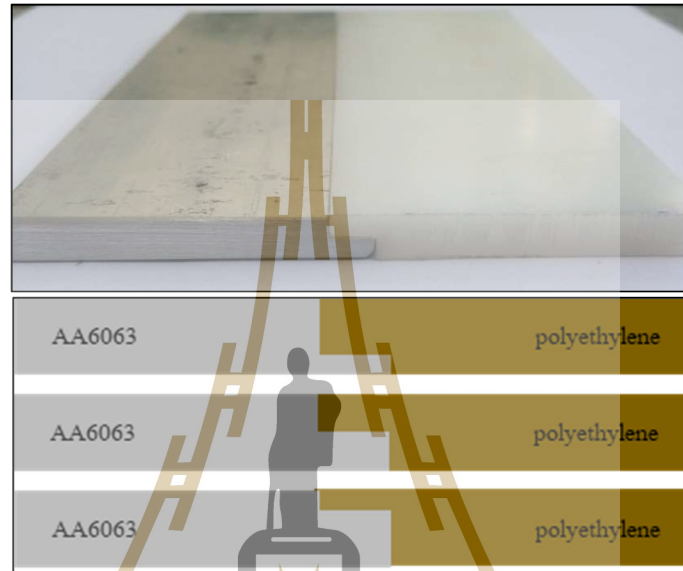


รูปที่ 4.2 ลักษณะของชิ้นงานภายหลังกลึงไส



รูปที่ 4.3 การเตรียมผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องกลึงผิวโลหะ

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมความหนาของผิวหน้าสัมผัสต่อชนทั้งสองชิ้นมาประกบกัน จะได้ชิ้นงานในลักษณะต่อชนแสดงในรูปที่ 4.4 การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในการศึกษานี้ แบ่งวิธีการเชื่อมออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นตอนใช้หัวกวนที่มีลักษณะแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ชิ้นงานก่อนการเชื่อมในลักษณะต่อชน ณ ความหนาหน้าสัมผัสที่แตกต่างกัน

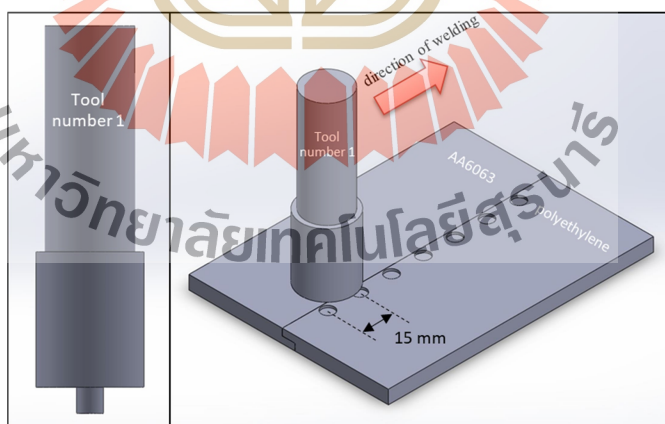


รูปที่ 4.5 ลักษณะของหัวกวนที่ใช้เชื่อม

ลักษณะของหัวกวนแบบที่หนึ่งประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งตัวกวน (pin) ทำหน้าที่ให้เนื้อวัสดุเกิดการหมุนวนและทำให้เกิดการประสานกันของวัสดุ ส่วนที่สองบ่าของหัวกวน (shoulder) ส่งผลให้เกิดความร้อนแก่วัสดุโดยกระบวนการเสียดสีทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและง่ายต่อการไหล หัวกวนแบบที่สองมีเพียงส่วนบ่าของหัวกวนเท่านั้นทำหน้าที่ในการปรับผิวหน้าของรอยเชื่อมและกดเนื้อของวัสดุลงหลุมที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุด โดยจะเคลื่อนที่ในแนวแกน y ดังแสดงในรูปที่ 4.6

4.3.2 การเชื่อม

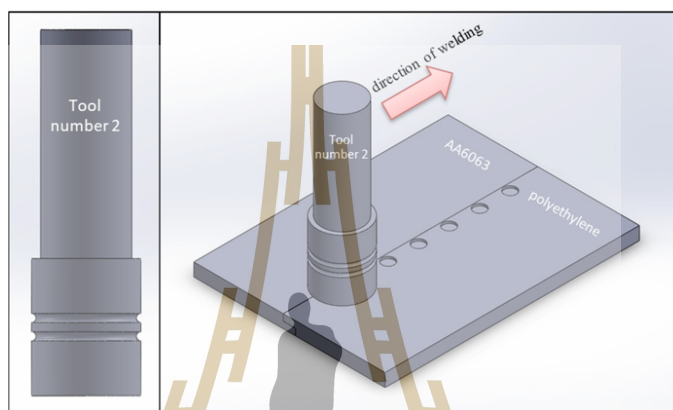
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดกระทำโดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นตอนใช้หัวกวนที่มีลักษณะต่างกัน ขั้นตอนแรกใช้หัวกวนที่มี pin ดังแสดงในรูป 4.6 ทำการกวนเนื้อวัสดุทั้งสองโดยการกดตัวกวน pin ลงชิ้นงานให้มีความลึก 5.8 มิลลิเมตร หรือจนกว่าบ่าของหัวกวนไปสัมผัสชิ้นงานเป็นเวลา 5 วินาที ด้วยความเร็วในการจุ่มหัวกวนลงสู่ชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากนั้นยกหัวกวนขึ้นทำซ้ำขั้นตอนข้างต้นตลอดชิ้นงานเชื่อมโดยแต่ละจุดห่างกันเป็นระยะ 15 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6 กระบวนการข้างต้นส่งผลให้เกิดหลุมในเนื้อของโลหะผสมอลูมิเนียมอีกทั้งในกระบวนการเชื่อมขั้นที่หนึ่งนี้ส่งผลให้เนื้อของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเข้าไปเติมในหลุมบางส่วน



รูปที่ 4.6 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในขั้นที่หนึ่ง

ขั้นตอนที่สองใช้หัวกวนที่สองมีรูปทรงดังแสดงในรูป 4.7 กดให้ผิวหัวกวนสัมผัสกับผิวของชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อมจากนั้นเคลื่อนที่สู่จุดตลอดแนวรอยเชื่อมและยกหัวกวนขึ้นจากชิ้นงาน

ดังแสดงในรูปที่ 4.7 การลู่ของหัวกวนในกระบวนการที่สองนี้ส่งผลให้เนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่สูงขึ้นมาจากรอยเชื่อมถูกกดให้ไหลกลับไปแทนที่ในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมที่เกิดจากการเชื่อมในขั้นที่หนึ่ง พร้อมทั้งปรับความเรียบผิวในแนวรอยเชื่อม สภาวะและตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดของโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.7 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในขั้นที่สอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงที่หนึ่งทำการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงคู่ความหนาแน่นสัมผัสและความเร็วในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงาน โดยกำหนดให้ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวนและความลึกในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงานเป็นค่าคงที่ดังตัวแปรที่แสดงในตารางที่ 4.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของคู่ความหนาแน่นสัมผัสที่เหมาะสมในการเชื่อม จากนั้นในการทดลองช่วงที่สองทำการเปลี่ยนแปลงสภาวะความเร็วรอบในการหมุนหัวกวนและความเร็วในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงาน และกำหนดให้ความหนาแน่นสัมผัสกับความลึกในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงานมีค่าคงที่ดังตัวแปรที่แสดงในตารางที่ 4.4 เพื่อศึกษาผลของสภาวะการเชื่อมต่องานเชื่อม

ตารางที่ 4.3 สภาวะที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในการศึกษาช่วงที่หนึ่ง

สภาวะที่ใช้ในการศึกษาช่วงที่หนึ่ง	ค่า
ความหนาหน้าสัมผัส (มิลลิเมตร)	1.6, 3.2, 4.8
ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน (รอบต่อนาที)	710
ความเร็วในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที่)	28, 56, 112
ความลึกในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	5.8

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในการศึกษาช่วงที่สอง

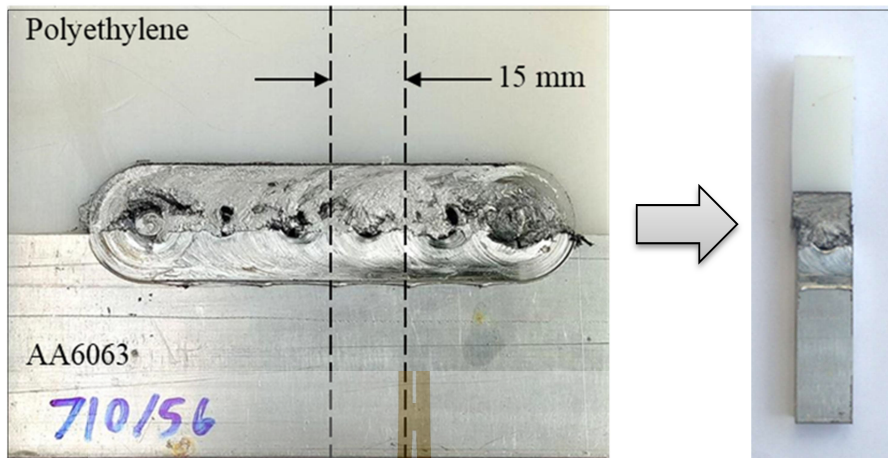
สภาวะที่ใช้ในการศึกษาช่วงที่สอง	ค่า
ความหนาหน้าสัมผัส (มิลลิเมตร)	3.2
ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน (รอบต่อนาที)	500, 710, 1000
ความเร็วในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที่)	28, 56, 112
ความลึกในการจุ่มหัวกวนลงชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	5.8

4.3.3 การตรวจสอบมหภาคของชิ้นงานเชื่อม

ชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดที่สภาวะต่างๆ แล้วจะถูกตรวจสอบรอยเชื่อมในระดับมหภาคเพื่อหาจุดบกพร่องบริเวณรอยเชื่อม เช่น ผิวของรอยเชื่อมไม่เรียบ ความสมบูรณ์ในการประสานของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด การเติมเต็มของเนื้อพอลิโอทิลีนความหนาแน่นสูงในหลุมบนเนื้อ โลหะผสมอลูมิเนียม รวมไปถึงบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อม

4.3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึง

หลังการเชื่อมระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิโอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดจะถูกทดสอบความแข็งแรงดึง โดยชิ้นงานเชื่อมจะถูกตัดขวางในแนวรอยเชื่อมให้มีความกว้าง 15 มิลลิเมตร บริเวณตำแหน่งคร่อมจุดที่ทำการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.8 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test) ใช้เครื่องทดสอบ instron universal testing machine รุ่น 5582 ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ใช้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่หัวจับยึดชิ้นงาน 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที




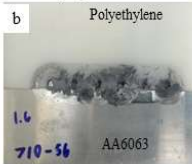

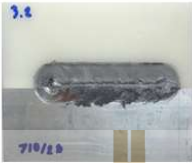
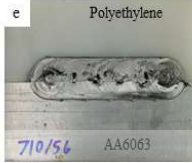

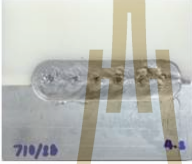
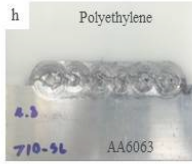

รูปที่ 4.8 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

หลังการที่ชิ้นงานเชื่อมผ่านการทดสอบความแข็งแรงดึงจนแตกหักจะถูกนำมาตรวจสอบบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน โดยการตรวจสอบด้วยสายตา เนื่องจากบริเวณที่ยึดเกี่ยวกันของเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นการยึดเกี่ยวกันในระดับมหภาค เพื่อศึกษาลักษณะของรอยแตก ลักษณะของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ยึดเข้าไปในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียม และกลไกการยึดเกี่ยวกันของเนื้อวัสดุ

4.4 ผลการทดลอง

4.4.1 รอยเชื่อม

ภายใต้สภาวะการเชื่อมที่ใช้ในการศึกษาเราสามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียม AA6063 กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดได้ ลักษณะของชิ้นงานหลังการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุด ณ สภาวะต่างๆแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 รอยเชื่อมในทุกสภาวะมีความไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากจุดบกพร่องบริเวณรอยเชื่อม โดยเฉพาะช่องว่างและหลุมมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณรอยเชื่อมซึ่งเกิดจากเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเดิมเต็มได้ไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณรอยเชื่อมเป็นสีเงินเนื่องจากเนื้อของโลหะผสมอลูมิเนียมถูกเสียดสีและหลุดเข้าไปผสมอยู่ในเนื้อของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในส่วนของความกว้างรอยเชื่อมไม่มีความแตกต่างกันแต่อย่างใด

Thickness of edge	Plunging speed 28 mm/min	Plunging speed 56 mm/min	Plunging speed 112 mm/min
	Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min
1.6 mm of aluminum edge thickness & 4.8 mm of polyethylene edge thickness			
3.2 mm of aluminum edge thickness & 3.2 mm of polyethylene edge thickness			
4.8 mm of aluminum edge thickness & 1.6 mm of polyethylene edge thickness			

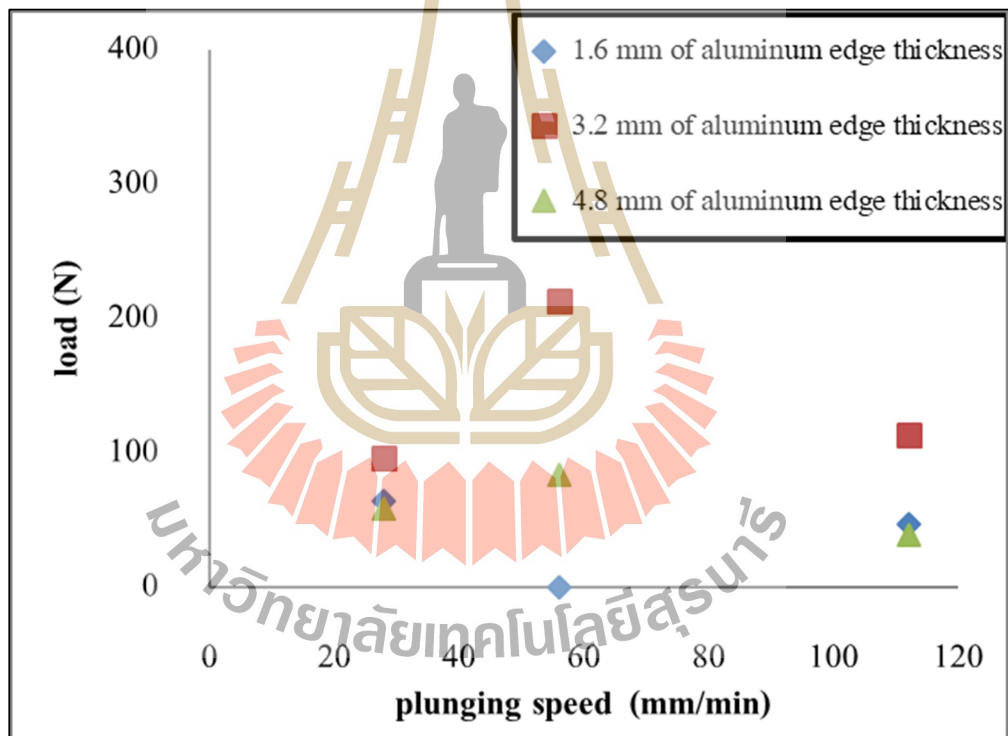
รูปที่ 4.9 ชิ้นงานหลังการเชื่อมคู่ความหนาหน้าสัมผัสแตกต่างกัน ความเร็วรอบของหัวควงคงที่ 710 rpm

Thickness of edge	Rotation speed	Plunging speed 28 mm/min	Plunging speed 56 mm/min	Plunging speed 112 mm/min
		Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min
3.2 mm of aluminum edge thickness & 3.2 mm of polyethylene edge thickness	500 rpm.			
	710 rpm.			
	1000 rpm.			

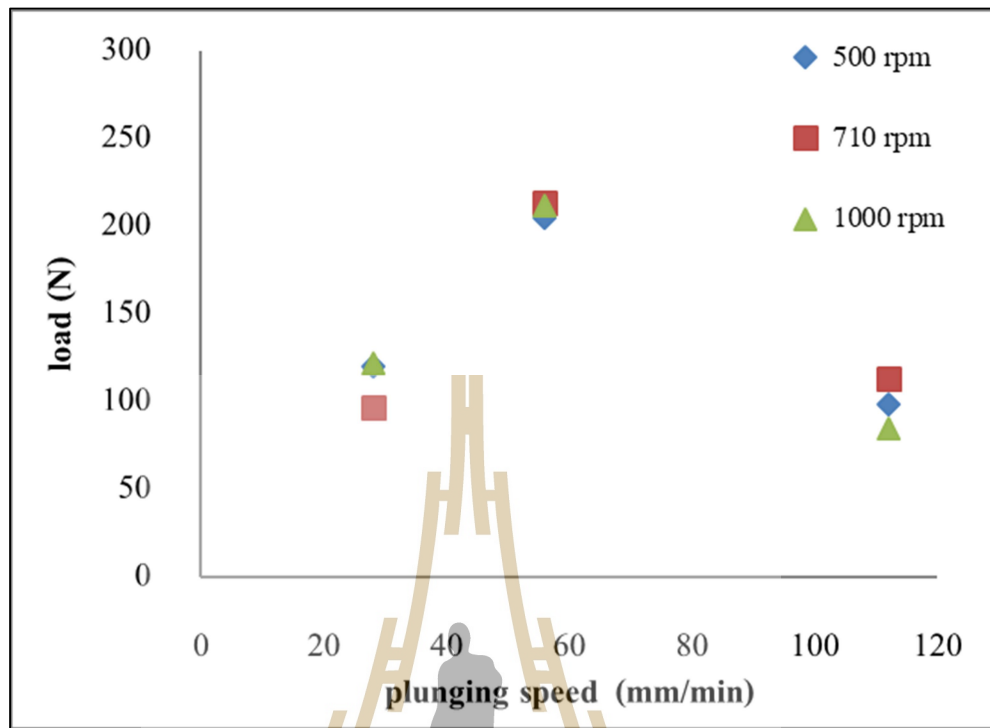
รูปที่ 4.10 ชิ้นงานหลังการเชื่อมคู่ความหนาหน้าสัมผัสคงที่ ความเร็วรอบของหัวควงแตกต่างกัน

4.4.2 ความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานภายหลังการเชื่อมถูกนำมาทดสอบความแข็งแรงดึงในทุกสภาวะการเชื่อม เพื่อหาความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อม รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการกดหัวทวนลงสู่ชิ้นงานกับความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมที่คู่ความหนาผิวหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อมแตกต่างกัน พบว่าคู่ความหนาผิวหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อม 3.2 มิลลิเมตร ให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมสูงสุดในทุกสภาวะการเชื่อมเมื่อเทียบกับความหนาผิวหน้าสัมผัสอื่นๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาต่อโดยกำหนดให้คู่ความหนาผิวหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อมที่ 3.2 มิลลิเมตร เป็นตัวแปรคงที่โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของหัวทวนและความเร็วในการกดหัวทวนลงสู่ชิ้นงาน



รูปที่ 4.11 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่คู่ความหนาผิวหน้าสัมผัสแตกต่างกัน

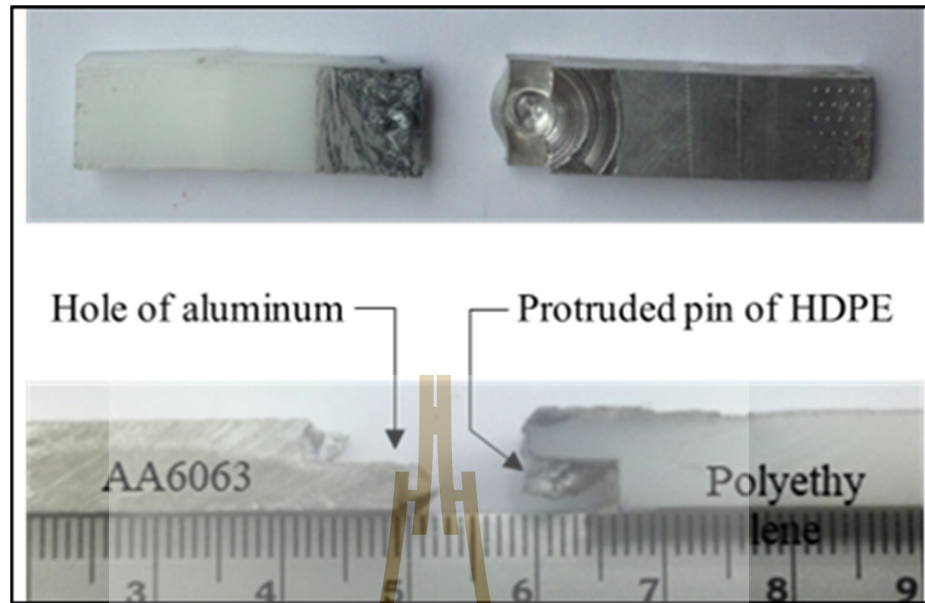


รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ความเร็วรอบในการหมุนของหัวควนแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการกดหัวควนลงสู่ชิ้นงานกับความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนของหัวควนแตกต่างกัน พบว่าเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของหัวควนเปลี่ยนแปลงไปความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะที่ความเร็วในการกดหัวควนลงสู่ชิ้นงาน 56 มิลลิเมตรต่อนาที

4.4.3 การตรวจสอบชิ้นงานแตกหัก

จากชิ้นงานแตกหักที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าลักษณะที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานเชื่อมทั้งสองคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงบริเวณผิวหน้าสัมผัสมีส่วนที่ยื่นยาวออกมาเรียกว่า (protruded pin of HDPE) และ โลหะผสมอลูมิเนียมถูกทำให้เกิดหลุมลึกลงไปใในเนื้อเรียกว่า (hole of aluminum) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงอิทธิพลความหนาหน้าสัมผัสต่อการยึดเกาะของชิ้นงานเชื่อมและต่อความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อม ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบบริเวณรอยแตกหักที่สภาวะต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.13 ชิ้นงานหลังจากการทดสอบความแข็งแรงดึง

Thickness of edge	Plunging speed 28 mm/min	Plunging speed 56 mm/min	Plunging speed 112 mm/min
	Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min
1.6 mm of aluminum edge thickness & 4.8 mm of polyethylene edge thickness			
3.2 mm of aluminum edge thickness & 3.2 mm of polyethylene edge thickness			
4.8 mm of aluminum edge thickness & 1.6 mm of polyethylene edge thickness			

รูปที่ 4.14 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบความแข็งแรงดึงที่คู่ความหนาหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อมแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 แสดงบริเวณแตกหักของชิ้นงานเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่คู่ความหนาหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อมแตกต่างกัน พบว่าความยาวและความสมบูรณ์ของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ยึดลงในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมมีความสัมพันธ์กับคู่ความหนาหน้าสัมผัส เนื่องจาก ณ คู่ความหนาหน้าสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปปริมาณของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและความลึกของหลุมในเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมมีความแตกต่างกัน ซึ่งที่คู่ความหนาหน้าสัมผัสของโลหะผสมอลูมิเนียม 3.2 มิลลิเมตรและ 4.8 มิลลิเมตร มีความลึกของหลุมโลหะผสมอลูมิเนียมที่เหมาะสม ที่สภาวะดังกล่าวจึงเกิดการยึดยาวของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในปริมาณมากกว่าการใช้ความหนาหน้าสัมผัสของโลหะผสมอลูมิเนียม 1.6 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามด้วยการใช้ความหนาหน้าสัมผัสของโลหะผสมอลูมิเนียมที่ 4.8 มิลลิเมตร ทำให้เนื้อของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเหลืออยู่การเติมเต็มหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมจึงมีมีปริมาณของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ไม่เพียงพอต่อการเติมเต็ม

Thickness of edge	Rotation speed	Plunging speed 28 mm/min	Plunging speed 56 mm/min	Plunging speed 112 mm/min
		Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 56 mm/min
3.2 mm of aluminum edge thickness & 3.2 mm of polyethylene edge thickness	500 rpm			
	710 rpm			
	1000 rpm			

รูปที่ 4.15 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบความแข็งแรงดึงในกลุ่มที่ควบคุมความหนาหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อม 3.2 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.15 แสดงบริเวณแตกหักของชิ้นงานเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดที่คู่ความหนาหน้าสัมผัสในแนวรอยเชื่อม กว้าง 3.2 มิลลิเมตร ณ สภาวะการเชื่อมต่างๆ พบว่าสภาวะความเร็วในการจุ่มหัวกวนลงสู่ชิ้นงานที่ 56 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นสภาวะที่มีการผลัดเนื้อของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงหลุมของ โลหะผสมอลูมิเนียมได้ในปริมาณสูงทำให้เนื้อของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ยืดยาวเข้าไปใน หลุมโลหะผสมอลูมิเนียมมีความยาวมากกว่าสภาวะอื่นและมีความสมบูรณ์มากกว่า ซึ่งปริมาณและ ความยาวของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เติมเต็มในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมมีอิทธิพล ต่อความแข็งแรงดึงของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.12

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่าในการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความ หนาแน่นสูงด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุด ปริมาณของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และความลึกของหลุมในเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียมส่งผลต่อความยาวและความสมบูรณ์ของเนื้อพอลิเอ ทิลีนความหนาแน่นสูงที่ยืดยาวลงในหลุมโลหะผสมอลูมิเนียม และด้วยความยาวและความ สมบูรณ์ของเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนี้เองเป็นปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการรับแรง ทางกลของชิ้นงานเชื่อมสูงขึ้น

4.5 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

การเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า การเชื่อมเสียดทาน แบบกวนเป็นจุดจะทำให้ได้รอยเชื่อมระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่น สูง แต่รอยเชื่อมยังไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการพัฒนาในลำดับถัดไป นอกจากนี้การยืดยาวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของงานเชื่อมไม่เท่ากัน โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อการยืดยาวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมภายใต้การศึกษานี้คือ ความหนาหน้าสัมผัสต่อชนกับ ความเร็วในการกดหัวกวนขณะเชื่อม

4.6 เอกสารอ้างอิง

[1] Seiji, K., and Yousuke K., 2008, Laser direct joining of metal and plastic, Scripta Materialia., 59, 1247–1250.

- [2] Wahba, M., Kawahito, Y., Katayama, S., 2011, Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate, *Journal of Materials Processing Technology.*, 211, 1166–1174.
- [3] Kitagawa, D., Nagatsuka, K., Nakata, K., 2013, *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding.*, ISBN: 978-1-78242-163-4.
- [4] Khodabakhshi, F., Haghshenas, M., Sahraeinejad, S., Chen, J., Shalchi, B., Li, J., 2014, Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high density polyethylene, *Materials Characterization.*, 98, 73–82.
- [5] Miyashita, Y., Takahashi, M., Takemi, M., Oyama, K., Mutoh, Y., and Tanaka, H., 2009, Dissimilar materials micro welding between stainless steel and plastics by using pulsed YAG laser, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering.*, Vol. 2, No. 2, pp. 409-415.
- [6] Holtkamp, J., Roesner, A., and Giller, A., 2010, Advances in hybrid laser joining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, Vol. 47, No. 9-12, pp. 923-930.
- [7] Farazila, Y., Miyashita, Y., Hua, W., Mutoh, Y., and Otsuka, Y., 2011, YAG laser spot welding of PET and metallic materials, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering.*, Vol. 6, No.1, pp. 69-74.
- [8] Rodríguez-Vidal, E., Sanz, C., Soriano, C., Leunda, J., Verhaeghe, G., 2016, Effect of metal micro-structuring on the mechanical behavior of polymer-metal laser T-joints, *Journal of Materials Processing Technology.*, 229, 668–677.
- [9] Okada, T., Uchida, S., Nakata, K., 2014, Direct joining of aluminum alloy and plastic sheet by friction laser processing, *Mater Sci Forum.*, 794-796:395-400.

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาผลของพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อระยะทางในขณะกวนเนื้อโลหะผสมอลูมิเนียม A6063-T831 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่เปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม คือ อัตราการหมุนหัวเชื่อมและความเร็วในการเคลื่อนที่หัวเชื่อมต่อลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้และสมบัติเชิงกล รวมถึงศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เพื่อลึอกแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับแผ่นโลหะผสมอลูมิเนียมได้ข้อสรุปการศึกษาดังนี้

1) ในการปั่นกวนโลหะผสมอลูมิเนียม พลังงานความร้อนต่อระยะทางในการกวนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนของหัวกวนเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกวนสูงขึ้น

2) ในการปั่นกวนโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ขนาดของเกรนในบ่อกวนและขอบบ่อมีขนาดเกรนเล็กกว่าเกรนเริ่มต้น ส่วนบริเวณกระทบบร้อนขนาดเกรนของโลหะผสมอลูมิเนียมจะโตกว่าขนาดเกรนเริ่มต้น ในกรณีของพลังงานความร้อนต่อระยะทางในการกวนที่ลงสู่ชิ้นงานเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเกรนโตขึ้นเล็กน้อยทั้งสองบริเวณและการโตของเกรนในบริเวณกระทบบร้อนทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมลดต่ำลง

3) สำหรับการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดจะทำให้ได้รอยเชื่อมระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แต่รอยเชื่อมยังไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการพัฒนาในลำดับถัดไป นอกจากนี้การยึดยาวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของงานเชื่อมไม่เท่ากัน โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดยาวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงในหลุมของโลหะผสมอลูมิเนียมภายใต้การศึกษานี้คือ ความหนาหน้าสัมผัสต่อชนกับความเร็วในการกดหัวกวนขณะเชื่อม

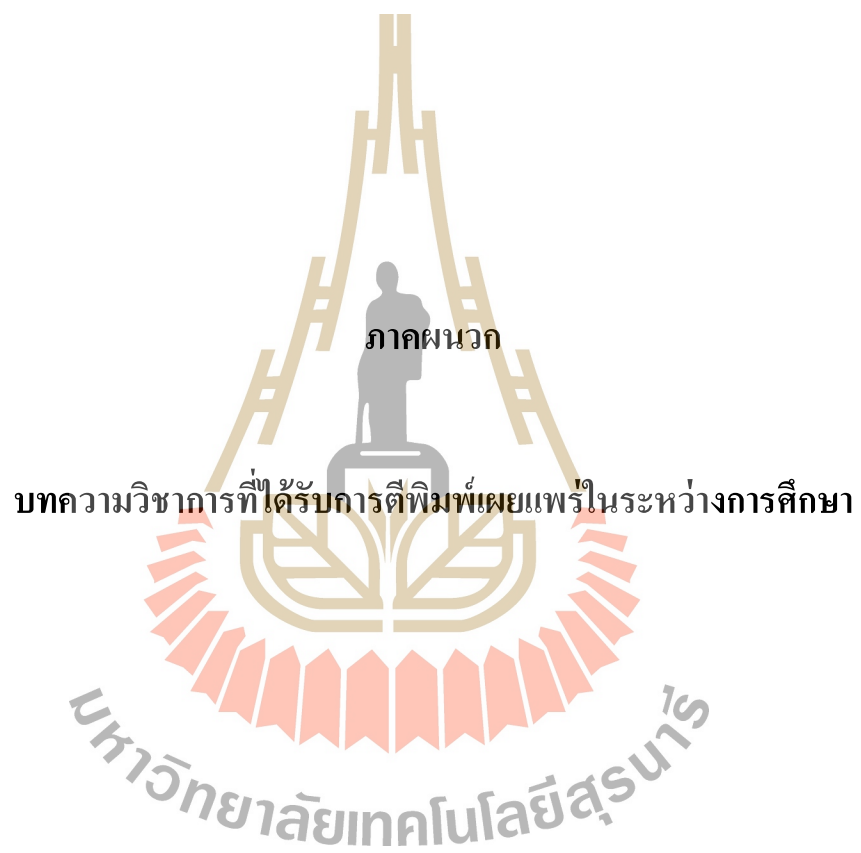
4) การเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีกลไกการเชื่อมติดต่างกันทำให้ตัวแปรงานเชื่อมนี้มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมใน

ลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น กรณีของการกวนโลหะผสมอลูมิเนียมกับพลังงานความร้อนลงสู่ชิ้นงานมีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมค่อนข้างมาก แต่การเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ความหนาหน้าสัมผัสต่อชนมีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อมมากกว่าเป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่างานวิจัยจะดำเนินมาได้ระดับหนึ่งแต่ยังมีข้อสงสัยอีกมากที่ต้องการคำตอบ ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการศึกษาพลังงานต่อระยะทางที่ลงสู่ชิ้นงานปั่นกวนโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสมอลูมิเนียม เนื่องด้วยพลังงานที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้เป็นพลังงานรวมที่คาดการณ์ว่าลงสู่ชิ้นงาน แผ่นรองชิ้นงาน และฐานของเครื่องกัด โลหะ ดังนั้นถ้าต้องการทราบพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานเพียงอย่างเดียวควรตรวจวัดแรงต้านหัวกวนในขณะที่เคลื่อนที่ แรงบิดของหัวกวนระหว่างการกวน ซึ่งจะทำให้ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานว่าเปลี่ยนแปลงไประหว่างการเชื่อมหรือไม่ ซึ่งค่าที่วัดได้จากเครื่องข้างต้นจะมีความแม่นยำกว่าเมื่อนำมาคำนวณเป็นพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงาน หรือในกรณีการศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิดด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ควรมีการศึกษาผลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นจุดในลักษณะสลับฟันปลาซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการต้านทานการคืบโค้งของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองฝั่ง หรือเดิมเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงไปในกลุ่มของโลหะผสมอลูมิเนียมภายหลังจากการเชื่อมของหัวกวนแบบที่หนึ่งซึ่งปริมาณเนื้อของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เติมเต็มในกลุ่มของโลหะผสมอลูมิเนียมส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยตรง

ดังนั้นในอนาคตจึงควรมียานวิจัยเพื่อศึกษาต่อไปที่จะยืนยันผลให้แน่ใจมากขึ้นทั้งการศึกษาพลังงานที่ลงสู่ชิ้นงานปั่นกวนโลหะผสมอลูมิเนียม และการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

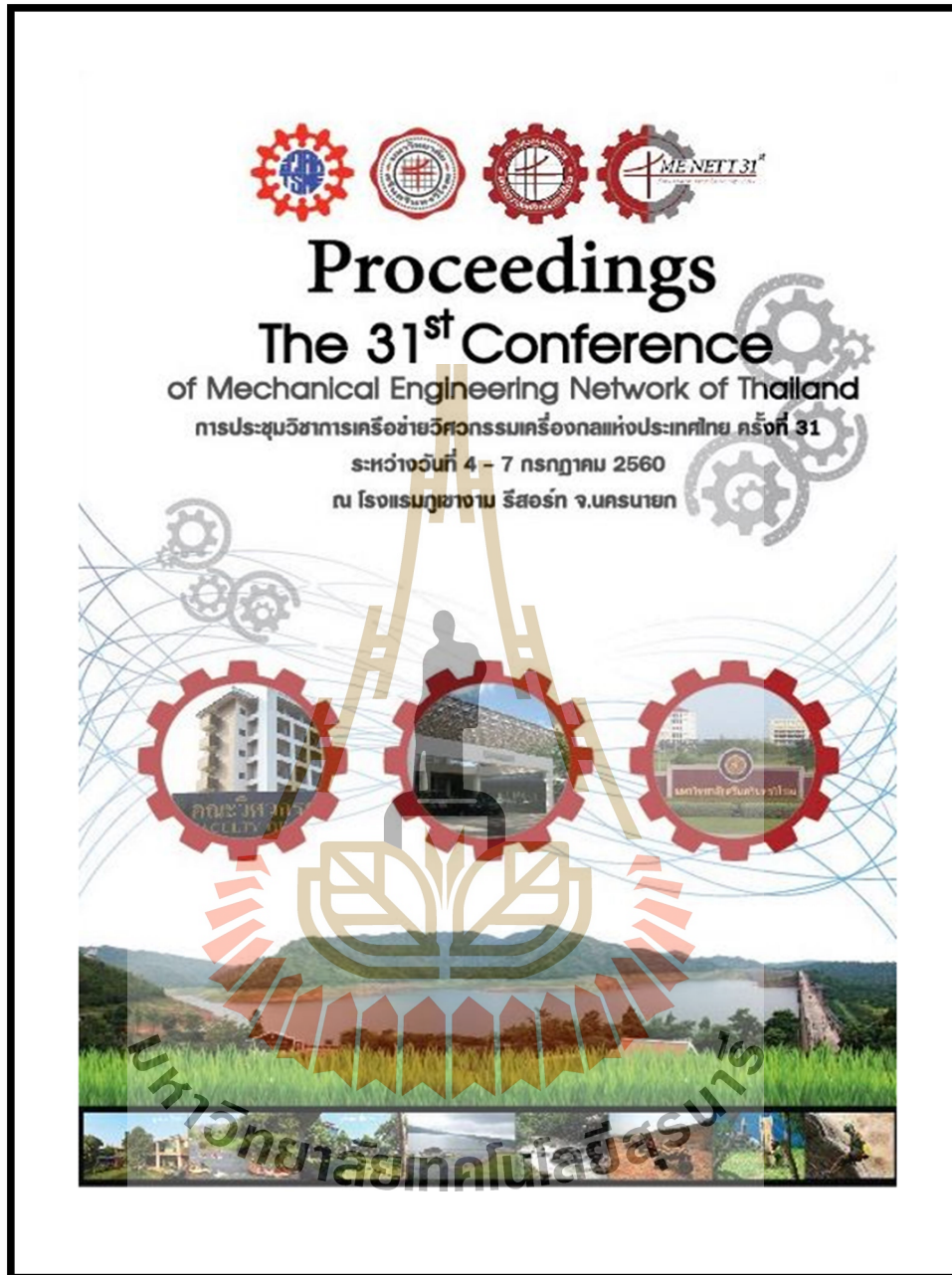


รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ธวัชชัย อินทร์ียง ปัญญา บัวสมบุรา และ รัตน บริสุทธิกุล (2560). การเชื่อมเสียดทานแบบกวนโลหะ ผสมอลูมิเนียม A6063-T831. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31 (MENETT31) ระหว่างวันที่ 4 - 7 กรกฎาคม 2560 ณ อุทยานรังสรรค์แห่งนวัตกรรมนครนายก

ธวัชชัย อินทร์ียง ปัญญา บัวสมบุรา และ รัตน บริสุทธิกุล (2560). การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบแบบจุดโลหะผสมอลูมิเนียม A6063-T831 กับ โพลีเอทิลีน. การประชุมวิชาการนานาชาติ 13th International Conference on Ecomaterials ครั้งที่ 13 (ICEM13) ระหว่างวันที่ 20 - 22 พฤศจิกายน 2560 ณ อาคารศูนย์ส่งเสริมสมรรถนะทางด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม เคอเอช จังหวัดกรุงเทพมหานคร.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



AMM – 08

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31

4 – 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก



การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม 6063 The Study of AA6063 Friction Stir Welding

ธวัชชัย อินทร์เม้ง¹, ปัญญา บัวอมบุร่า¹, รัตนา บรรณิสุทกุล^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ต.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*อีเมล: rattana@usut.ac.th

Tawatchai Intaing¹, Panya Buahombura¹, Rattana Borrisutthekul^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*E-mail: rattana@usut.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของพลังงานที่สูญเสียรอยเชื่อมในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวนโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด 6063 ที่เปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม คือ อัตราการหมุนหัวเชื่อมในช่วง 450 ถึง 1120 รอบต่อนาที และความเร็วในการเคลื่อนที่หัวเชื่อมในช่วง 28 ถึง 112 มิลลิเมตรต่อนาที ต่อลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้ จากการศึกษาพบว่าขนาดบ่อกวนบริเวณผิวชิ้นงานด้านบนที่เชื่อมด้วยหัวเชื่อม และบริเวณผิวด้านล่างที่เชื่อมด้วยแผ่นรองไม่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานที่สูญเสียรอยเชื่อม ในขณะที่ขนาดของบ่อกวนบริเวณใต้ปากหัวเชื่อมลดลงประมาณ 1/3 ของความหนาชิ้นงานขนาดของบ่อกวนจะกว้างขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานสูญเสียมากขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่าเกรนของแอลูมิเนียมขนาดเล็กรอบใจกลางบ่อกวนและขนาดของเกรนแอลูมิเนียมที่ขอบไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญภายในบ่อกวนจนถึงระยะที่ใกล้กับขอบบ่อกวนซึ่งมีเกรนที่เล็กรุนแรงมากจนไม่สามารถวัดขนาดเกรนได้ และบริเวณที่ถัดจากการเล็กรุนของบ่อกวนแอลูมิเนียมขนาดใหญ่โดยขนาดเกรนบริเวณนี้ใหญ่กว่าขนาดเกรนเริ่มต้นก่อนการเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดเกรนบริเวณต่างๆในบ่อกวนไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่สูญเสียรอยเชื่อมเพียงอย่างเดียว ขณะที่ขนาดของเกรนแอลูมิเนียมที่ขอบบ่อกวนขึ้นกับพลังงานความร้อนที่สูญเสียชิ้นงานเล็กน้อยเท่านั้น

คำหลัก: เชื่อมเสียดทานแบบกวน, พลังงาน, ขนาดเกรน, ขนาดบ่อกวน



Abstracts

The effect of energy consume during friction stir welding (FSW) process into the welded 6063 aluminum alloy joint is investigated in this study. The energy consume is evaluated by converting from electrical power used during welding process in each FSW conditions. In order to investigate this effect, varying of FSW parameters by using rotating speed in range of 450 to 1120 rpm and travelling speed in range of 28 to 112 mm/min are conducted for observing the welded joints characteristics by FSW process. The macroscopic and microscopic examination of the FSWed joints are observed in

The 13th International Conference on Ecomaterials (ICEM13) Innovative Green Materials and Technologies for Sustainability under the Sufficiency Economy


ICEM2017

November 19-23, 2017
KMUTT Knowledge Exchange for Innovation Center (KIC)
Khlongsan, Bangkok, Thailand
<http://icem13.kmutt.ac.th>



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

FSCI+ KM





Friction stir spot welding of Aluminum alloy and Polyethylene

Tawatchai Intaing¹, Panya Buahombura¹, Rattana Borrisutthekul^{1*}

¹School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*e-mail: rattana@g.sut.ac.th

Abstract: It has been known that the joint between dissimilar materials, aluminum alloys and polyethylene is difficult due to no reaction of both materials. Thus, the mechanical locking of both materials is only a mechanism that is possible to fasten them. In this present work, the friction stir spot welding, which has been prospected to produce the polyethylene pin for locking into AA6063 aluminum alloy sheet, is employed for joining polyethylene to AA6063 aluminum alloy. Rotational speed, traveling speed, and machined edge thickness are varied to understand their effects on mechanical properties of the joints. The results indicate that AA6063 aluminum alloy and polyethylene sheets can be successfully joined with mechanical interlocking of the materials. However, the load capacity of joints is too low when compared to load capacity of base materials. The maximum of load capacity of joints in this study is only 213 N. Moreover, the rotation speed and traveling speed are not affected to load capacity of joints. On the contrary, it seems to be relied on the machined edge thickness which could provide the suitable welding geometry for mechanical locking.

Keywords: Friction stir spot welding; Aluminum alloys; High density polyethylene; Dissimilar materials

1. Introduction

Electric vehicle has been proposed to be the eco-friendly transportation system in the future, when most electrical energy use in our life has been generated by renewable energy. In order to improve electric vehicle energy efficiency, reducing vehicle weight is one of the most important factor that we have to concern. The concepts of hybrid structure and functional structure have been thus introduced in order to meet that requirement. When using hybrid structure or functional structure, welding of dissimilar materials cannot be denied, especially welding between plastics and metals. The research of the welding of the dissimilar materials between plastics and metals has been investigated by many researchers but Katayama *et al.*¹ is the first person who success in joining plastics and metals by laser welding process. Then, many research works concerning on dissimilar material welding by friction stir welding, laser welding, ultrasonic welding

have been carried out^{2,3,4,5,6,7,8}. Moreover, for the theoretical point of views, there are two joining mechanisms, 1) reaction welding mechanism, and 2) mechanical interlocking mechanism, which could be fasten plastics to metals. From previous works and our experiences, some plastics which are in molecule may have no functional group, such as ester group, etc., might be reacted to surface of some metals such as stainless steel and so on, and produce the reaction welding⁹. However, when welding plastics with no functional group such as polyethylene, polypropylene, and so far, to metals, the reaction might be difficult to occur. Thus, to weld plastics with no functional group to metals, the mechanical interlocking mechanism is only one chance to produce the joint. It has been known for many years that friction stir spot welding process could produce the welds with strong mechanical interlocking due to the characteristic of welding process. Therefore, in this study we applied friction

stir spot welding process for welding a plastic with no functional group, i.e. high density polyethylene, to a metal, i.e. aluminum alloy, in order to study the feasibility of welding dissimilar materials by using friction stir spot welding process.

2. Materials and Methods

In the study, the base materials used were AA6063 aluminum alloy and commercial high density polyethylene (HDPE) sheet. Their size was 6.4x50x125 mm. Also, their mechanical properties are listed in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of base materials.

Materials	Ultimate Tensile strength (MPa)
AA6063	205.82
HDPE	20.3

Before welding, upper surface of edge of long side was machined to 1.6, 3.2, and 4.8 mm of thickness with 6 mm of width as shown in Figure 1.



Figure 1. Mechanical edge shapes.

Then, both material sheets were clamped to have the welding configuration as presented in Figure 2. The friction stir spot welding process was done in two steps with two types of welding tool as shown in Figure 3. In the first step, the friction stir spot welding was done by the tool number 1 as schematically shown in Figure 4. The welding conditions for the friction stir spot welding were represented in Table 2. Then,

HDPE plastic at upper surface was re-spread by rotating the tool number 2 on the top of surface of weld with 710 rpm of rotation speed and traveling speed at same as pushing speed using in filling the hole producing after the first welding step. The example of weld after the second welding step is shown in Figure 4.

Table 2. Welding parameters for the first welding step

Welding parameters	Value
Edge thickness (mm)	1.6, 3.2, and 4.8
Tool rotation speed (rpm)	710
Pushing speed (mm/min)	28, 56, and 112
Pin penetration depth	5.8 mm

AA6063 polyethylene

Figure 2. Schematic of friction stir spot welding between aluminum alloy and Polyethylene.



Figure 3. Two welding tools used in the study

After welding, the visual inspection of welds was carried out. For tensile testing, the welds were cut in dash line as shown in Figure 5. To examine the tensile characteristics of dissimilar joints between AA6063 and HDPE, transverse tensile testing was conducted at room temperature and strain rate of 0.5 mm/min was performed by using a 5582 Instron Universal Testing Machine. Finally, the broken specimens after tensile testing were

examined to understand the welding mechanism.

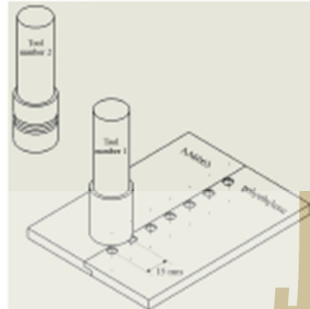


Figure 4. Schematic friction stir spot welding process.

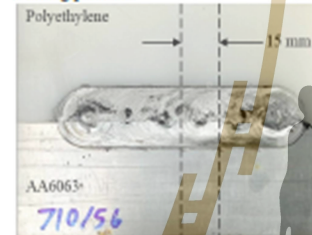


Figure 5. Example of weld and path of cutting.

3. Results & Discussion

3.1 Visual inspection of welds

Under welding conditions used in the study, we could successfully weld AA6063 to HDPE with mechanical interlocking mechanism. By the ways, after the first step of welding, the pin of welding tool, which was penetrated into the base materials, generated a hole on the welding specimen with its depth of about 5.8 mm. These holes were re-filled by HDPE in the second welding step. However, we could not fully fill the hole by HDPE. Figure. 6 shows the evidences of unfilled area on the upper surface of weld. Moreover, if we compare the weld geometry obtaining by the use of

the different machine edge thickness, we cannot realize the differentiation of welding quality by applying the visual inspection.

3.2 Tensile testing of welds

Table 3 shows the load carrier capacity of welds after tensile testing. From Table 3, it has found that the load carrier capacity of welds having the machined edge thickness of 3.2 mm is the highest compared with that of others. In addition, the load carrier capacity of weld by using 4.8 mm of machine edge thickness was always higher than that the use of 1.6 mm of machined edge thickness. Thus, it might be that the load carrier capacity of welds between HDPE and AA6063 by friction stir spot welding was dependent on the machined edge thickness. The suitable machined edge thickness will provide the good mechanical interlocking with good load carrier capacity.

3.3 Investigation of welds after tensile testing

In order to understand why the machined edge thickness has the significant effect on the load carrier capacity of welds, we conducted the investigation of welds after tensile testing. Figure. 7 shows the broken weld specimens obtained after tensile testing. From Figure. 7, it could be seen that the protruded pin of HDPE into the hole of aluminum alloy was longer when the higher machined edge thickness of AA6063 for welding was applied. Moreover, the thickness of HDPE in the welding area decreased with increasing machined edge thickness of AA6063 for welding. Furthermore, during welding, we observed that HDPE at welding area was bended by slip load during tensile testing. The bended HDPE was pulled the protruded pin out from the hole on AA6063. Thus, the thickness of HDPE at welding area and length of protruded pin should strongly influence on the load

carrier capacity of welds. Also, the protruded pin length and thickness of HDPE at welding area are relied on the machined edge thickness of both materials.

Therefore, the load carrier capacity of weld seems to be relied on the machined edge thickness, which could provide the suitable welding geometry for mechanical locking.

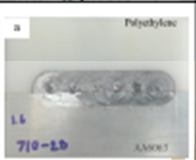
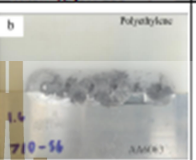
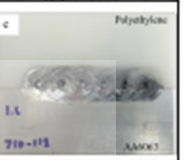


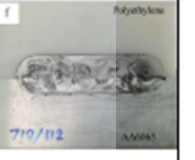
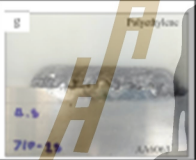
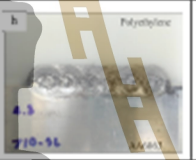
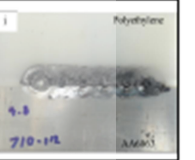
Edge of thickness	Pushing speed 28 mm/min	Pushing speed 56 mm/min	Pushing speed 112 mm/min
	Traveling speed 28 mm/min	Traveling speed 56 mm/min	Traveling speed 112 mm/min
1.6 mm			
3.2 mm			
4.8 mm			

Figure 6. Top view of friction stir spot welding specimens.



Figure 7. Observation of broken weld specimens obtained after tensile testing.

Table 3 The maximum of load carrier capacity of weld

Rotation speed	710 rpm		
Pushing rate	28 mm/min	56 mm/min	112 mm/min
Edge thickness	1.6 mm	0	0
	3.2 mm	205 N.	213 N.
	4.8 mm	93 N.	58 N.

4. Conclusion

According to the results of the study, AA6063 aluminum alloy and polyethylene sheets could be successfully joined with mechanical interlocking by using friction stir spot welding process. However, the load carrier capacity of welds was found to be low when compared with the load carrier capacity of the base materials. The maximum of load carrier capacity of weld in this study was only 213 N at a condition of edge thickness of 3.2 mm with rotational speed of 710 rpm and pushing speed 56 mm/min followed by refilling the friction stir spot welding hold using tool no.2 with traverse speed of 63 mm/min. The load carrier capacity of weld seems to be relied on the machined edge thickness, which could provide the suitable welding geometry for mechanical locking.

5. Acknowledgements

We wish to thank Dr.Pusit Mitsomwang for guiding comments on the research.

6. References

- Seiji, K., and Yousuke K., 2008, Laser direct joining of metal and plastic, *Scripta Materialia.*, 59, 1247-1250.
- Wahba, M., Kawahito, Y., Katayama, S., 2011, Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate, *Journal of Materials Processing Technology.*, 211, 1166-1174.
- Kitagawa, D., Nagatsuka, K., Nakata, K., 2013, Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding., ISBN: 978-1-78242-163-4.
- Khodabakhshi, F., Haghshenas, M., Sahraeinejad, S., Chen, J., Shalchi, B., Li, J., 2014, Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high density polyethylene, *Materials Characterization.*, 98, 73-82.
- Miyashita, Y., Takahashi, M., Takemi, M., Oyama, K., Mutoh, Y., and Tanaka, H., 2009, Dissimilar materials micro welding between stainless steel and plastics by using pulsed YAG laser, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering.*, Vol. 2, No. 2, pp. 409-415.
- Holtkamp, J., Roesner, A., and Giller, A., 2010, Advances in hybrid laser joining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, Vol. 47, No. 9-12, pp. 923-930.
- Farazila, Y., Miyashita, Y., Hua, W., Mutoh, Y., and Otsuka, Y., 2011, YAG laser spot welding of PET and metallic materials, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering.*, Vol. 6, No.1, pp. 69-74.
- Rodriguez-Vidal, E., Sanz, C., Soriano, C., Leunda, J., Verhaeghe, G., 2016, Effect of metal micro-structuring on the mechanical behavior of polymer-metal laser T-joints, *Journal of Materials Processing Technology.*, 229, 668-677.
- Okada, T., Uchida, S., Nakata, K., 2014, Direct joining of aluminum alloy and plastic sheet by friction lab processing, *Mater. Sci Forum.*, 794-796:389-400.

ประวัติผู้เขียน

นายรัชชัย อินเที่ยง เกิดเมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2530 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดห้วยเขน ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบางมูลนากวิทยาكم อำเภอบางมูลนาก จังหวัดพิจิตร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2552

ในปี พ.ศ. 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้ทำการวิจัยในหัวข้อการศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างโลหะกับพลาสติกด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวน ภายใต้ที่ปรึกษาอาจารย์ ดร.ปัญญา บัวสมบุรา และ ดร. รัตน์ บริสุทธิ์กุล ในระหว่างการเรียนต่อได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการโลหการกายภาพ 3 และปฏิบัติการโลหการเครื่องกล ส่วนทางด้านวิชาการได้เสนอบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 31 เรื่องการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม 6063 รวมถึงได้เสนอบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ International Conference on Ecomaterials 2017 ครั้งที่ 13 ใน หัว ่ อ เรื่อง Friction stir spot welding of Aluminum alloy and Polyethylene

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี