

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดต่อโครงสร้างจุดภาคและความ  
แข็งแรงดึงรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และ AA5052

**INFLUENCE OF FRICTION STIR SPOT WELDING PARAMETER  
ON MICROSTRUCTURE AND CROSS TENSION STRENGTH  
OF LAP JOINT BETWEEN AA1100 ALUMINUM ALLOY AND  
AA5052 ALUMINUM ALLOY**

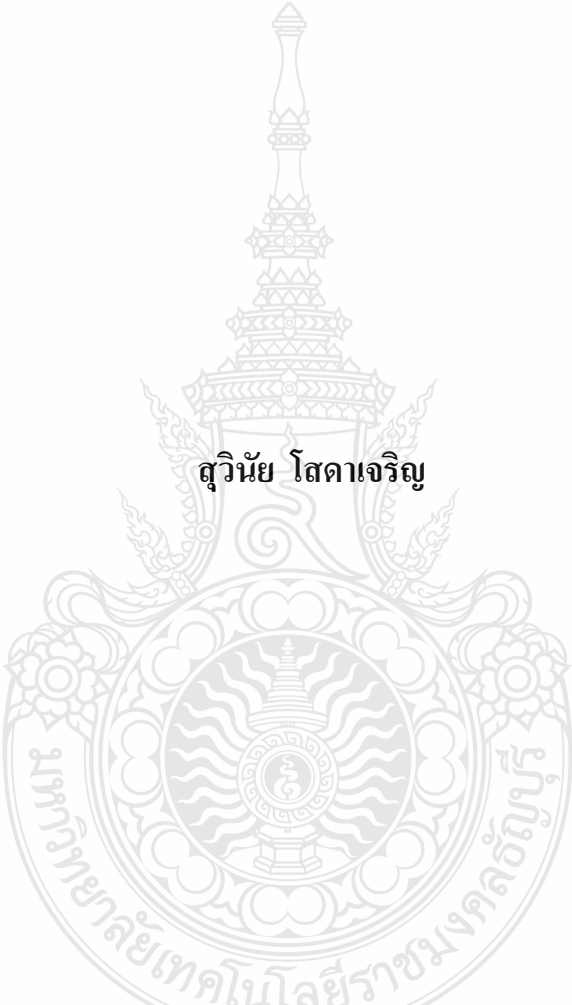


ศุวินัย โสตาเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดต่อโครงสร้างจูลภาค  
และความแข็งแรงดึงรอยต่อเกยระหว่างอคูมิเนียมผสมเกรด AA1100  
และ AA5052

สุวินัย โสดาเจริญ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**INFLUENCE OF FRICTION STIR SPOT WELDING PARAMETER ON  
MICROSTRUCTURE AND CROSS TENSILE STRENGTH OF LAP JOINT  
BETWEEN AA 1100 ALUMINUM ALLOY AND AA 5052 ALUMINUM ALLOY**

**SUVINAI SODAJAROEN**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEER  
PROGEAM IN MANUFACTURING ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY THANYABURI ACADEMIC YEAR 2014  
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดต่อ โครงสร้างจุลภาคและความ  
แข็งแรงดึงของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และ AA5052  
Influence of Friction Stir Spot Welding Parameter on Microstructure and Cross  
Tension Strength of Lap Joint between AA1100 Aluminum Alloy and AA5052  
Aluminum Alloy

ชื่อ - นามสกุล

ว่าที่ร้อยตรีสุวินัย โสดาเจริญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



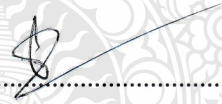
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)



กรรมการ

(อาจารย์สมพงษ์ พิริยานต์, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์หัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 17 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2558



หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงดึงของรอยต่อเกสรระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และ AA5052
ชื่อนักศึกษา	ว่าที่ร้อยตรี สุวินัย โสคาเจริญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

รอยต่อเกสรอลูมิเนียมต่างชนิดมีการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์เนื่องจากรอยต่อที่สมบูรณ์ของอลูมิเนียมต่างชนิดทำให้ได้โครงสร้างวัสดุหลายที่แสดงค่าสมบัติยืดหยุ่นและทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างลดลง อย่างไรก็ตามข้อมูล เทคนิคการเชื่อมอลูมิเนียมต่างชนิดที่มีรอยต่อสมบูรณ์มีค่อนข้างน้อยในปัจจุบัน ด้วยเหตุผลนี้การศึกษาเพื่อหาตัวแปรการเชื่อมรอยต่อเกสรด้วยวิธีการเชื่อมต่างๆ จึงมีวิธีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงดึงรอยต่อเกสรระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และ AA5052

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ แผ่นอลูมิเนียมผสม AA1100 และ AA5052 หนา 1.0 มิลลิเมตร รอยต่อเกสรถูกทำการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดด้วยตัวแปรที่ประกอบด้วยความเร็วรอบการหมุน เวลา கடແ່ และอัตราการป้อนตัวกวน รอยต่อเกสรที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำมาทำการศึกษาเพื่อหาความแข็งแรง ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมแสดงค่าแรงดึงสูงสุด 6020 นิวตัน คือ ระยะตัวกวน 1.4 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 3,000 รอบ/นาที เวลา கடແ່ 3 วินาที และอัตราการป้อนตัวกวน 8 มิลลิเมตร/นาที ระยะปลายตัวกวน ความเร็วรอบและระยะเวลา கடແ່ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคที่ผิวสัมผัสคล้ายตะขอสอง และแสดงการรวมกันอย่างสมบูรณ์ของอลูมิเนียมทั้งสองชนิดและส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงรอยต่อ

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อลูมิเนียม ความแข็งแรงของรอยต่อ ผิวสัมผัสคล้ายตะขอ

**Thesis Title** Influence of Friction Stir Spot Welding Parameter on Microstructure and Cross Tension Strength of Lap Joint between AA1100 Aluminum Alloy and AA5052 Aluminum Alloy

**Name-Surname** Acting Lt. Suvinai Sodajaroen

**Program** Manufacturing Engineering

**Thesis Advisor** Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.

**Academic year** 2014

## ABSTRACT

Dissimilar aluminums lap joint is applied in automobile industry because a sound joint between these materials could produce multi-materials structure with flexible properties and decrease the gross weight of the structure. However, an availability of a sound joint welding technique for joining these aluminums presently indispensable. Therefore, an optimized welding process parameter for joining this lap joint by various welding techniques is still investigating. This research aimed to study an influence of friction stir spot welding parameter on microstructure and cross tension strength of a lap joint between AA1100 aluminum alloy AA5052 aluminum alloy.

Materials used in this study were 1.0 mm thick sheet of AA1100 aluminum alloy AA5052 aluminum alloy. Friction stir spot welding produced a cross tensile lap joint of dissimilar aluminum using various rotating speeds, holding times and tool insert rates. Lap joints that were produced by various parameters were investigated for mechanical properties and microstructure.

The summarized results are as follows. The optimized welding parameter that showed a maximum tensile force of 6020 N was the pin length of 1.4 mm, the rotating speed of 3000 rpm, the holding time of 3 s, the pin inserting rate of 8 mm/min. Increase of the pin length, the rotating speed and the holding time affected to increase the joint strength of the lap joint. Microstructure showed a hook-like and a completed combination of aluminum at the joint interface and also affected to increase across tensile strength.

**Keywords:** friction spot joining, aluminum, joint strength, hook-like interface

## กิตติกรรมประกาศ

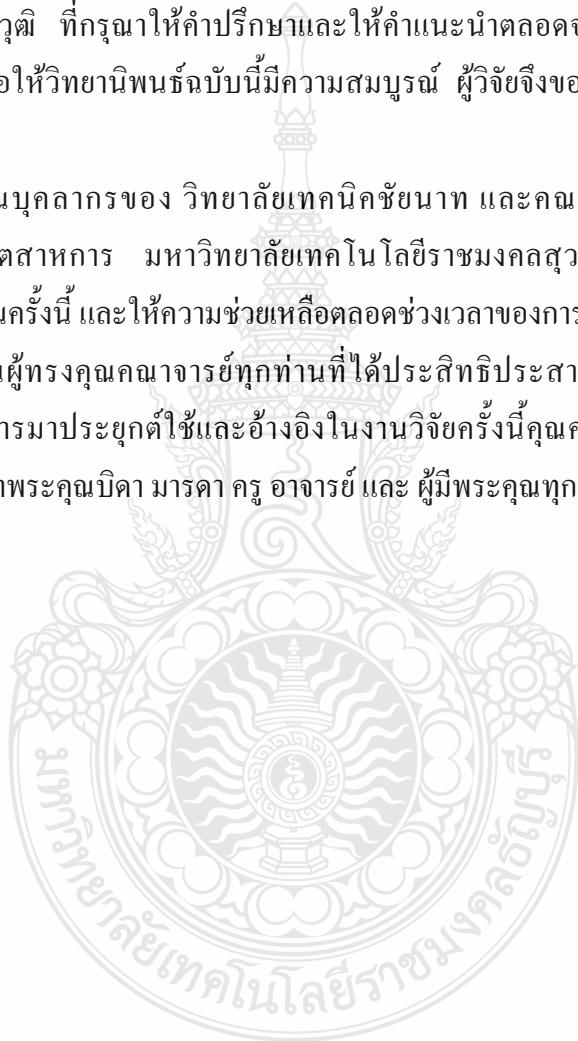
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยการช่วยเหลือของผู้มีอุปการคุณ ที่ให้ข้อเสนอแนะด้าน ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ในด้านต่าง ๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง คณะกรรมการสอบ และ ดร.สมพงษ์ พิริยานต์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของ วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท และคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัย สามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุวินัย โสคาเจริญ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อะลูมิเนียม.....	4
2.2 ขั้นตอนการเชื่อม.....	13
2.3 การทดสอบชิ้นทดสอบ.....	16
2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	24
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2 ขั้นตอนการเชื่อม.....	30
3.3 การทดสอบรอยเชื่อม.....	36
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	43
4.1 ผลทดสอบเบื้องต้น.....	43
4.2 อิทธิพลของเวลา கடແໜ່ທີ່ສົ່ງຜົນຕໍ່ຄວາມແຂ້ງແຮງດຶງແບບກາກບາທ.....	46
4.3 อิทธิพลของความเร็วยวรอบและความยาวปลายตัวกวนต่อความแข็งแรงดึงแบบกาคบาท ...	58
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด.....	63

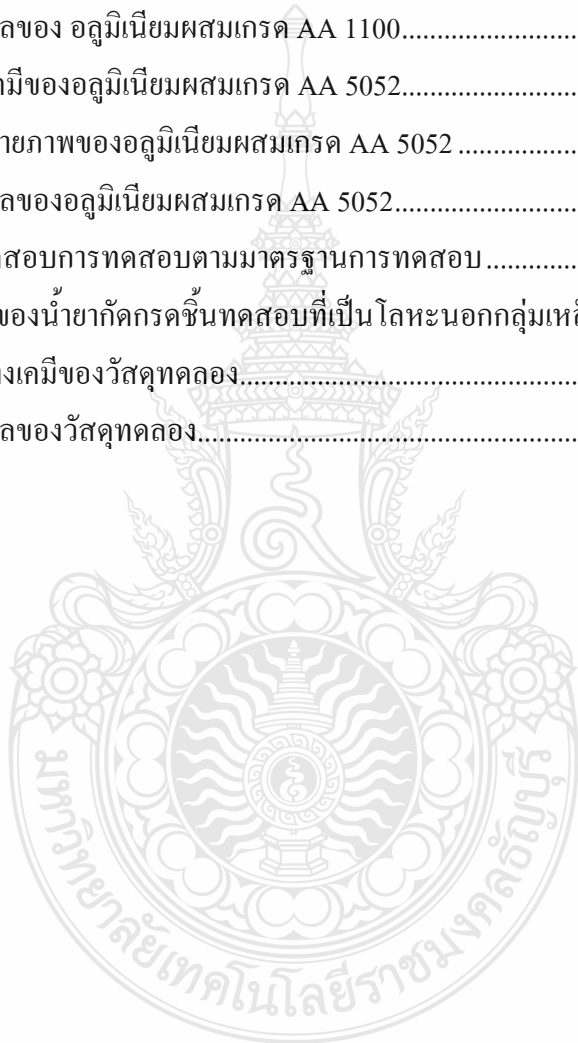
## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.5 การทดสอบความแข็งแรงเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด .....	67
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	70
เอกสารอ้างอิง .....	71
ภาคผนวก .....	74
ภาคผนวก ก การตีพิมพ์เผยแพร่ .....	75
ประวัติผู้เขียน .....	83



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวเลข 4 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมขึ้นรูป.....	5
2.2	สัญลักษณ์ที่กำหนดกรรมวิธีทางความร้อนของอะลูมิเนียม.....	8
2.3	สมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100.....	10
2.4	สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100.....	10
2.5	สมบัติทางกลของ อะลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100.....	11
2.6	สมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052.....	11
2.7	สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052.....	12
2.8	สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052.....	12
2.9	ขนาดขึ้นทดสอบการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ.....	18
2.10	รายละเอียดของน้ำยากัดกรดขึ้นทดสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก.....	23
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง.....	29
3.2	สมบัติทางกลของวัสดุทดลอง.....	29



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	อลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100..... 11
2.2	อลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052..... 12
2.3	กระบวนการเชื่อมแรงเสียดทานกวนแบบจุด..... 14
2.4	รูปทรงเครื่องมือเชื่อม ..... 15
2.5	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในกระบวนการเชื่อม..... 16
2.6	ทิศทางแรงดึง..... 17
2.7	หัวข้อและรอยกดของการทดสอบความแข็ง แบบวิกเกอร์ส ..... 20
2.8	การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค ..... 21
2.9	การขัดผิวชิ้นทดสอบ ..... 22
3.1	ขนาดของวัสดุทดลองอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และ อลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 30
3.2	ขนาดและรูปร่างตัวกวน ..... 31
3.3	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแบบกากบาท..... 31
3.4	เครื่องตัดโลหะแผ่นแบบกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ GASPARINI รุ่น C0 3004..... 32
3.5	เครื่องเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด..... 33
3.6	การประกอบตัวกวนและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน..... 34
3.7	การจัดวางชิ้นงานเชื่อม..... 34
3.8	การทำการเชื่อมทดลอง..... 35
3.9	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาท ..... 36
3.10	เครื่องทดสอบแรงดึงแบบอเนกประสงค์ ยี่ห้อ United รุ่น SHFM – 1000 KN..... 37
3.11	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาท ..... 38
3.12	ด้านการตรวจสอบผิวหน้าการพังทลายรอยเชื่อมทดสอบแรงดึง ..... 39
3.13	ชิ้นงานหลังจากการหล่อเรซินหรือเมาส์ดิ่ง..... 39
3.14	ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง..... 40
3.15	การขัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน ..... 41
3.16	กล้องส่องโครงสร้างจุลภาค ยี่ห้อ OLYMPUS BX51M ..... 42
4.1	ลักษณะปลายเครื่องมือเชื่อมที่มีอลูมิเนียมติดที่บริเวณปากตัวกวน ..... 44
4.2	ชิ้นงานเชื่อมความเร็วรอบตัวกวน 2,000 rpm เวลากดแช่ 3 s อัตราการกด 8 mm/min .... 45

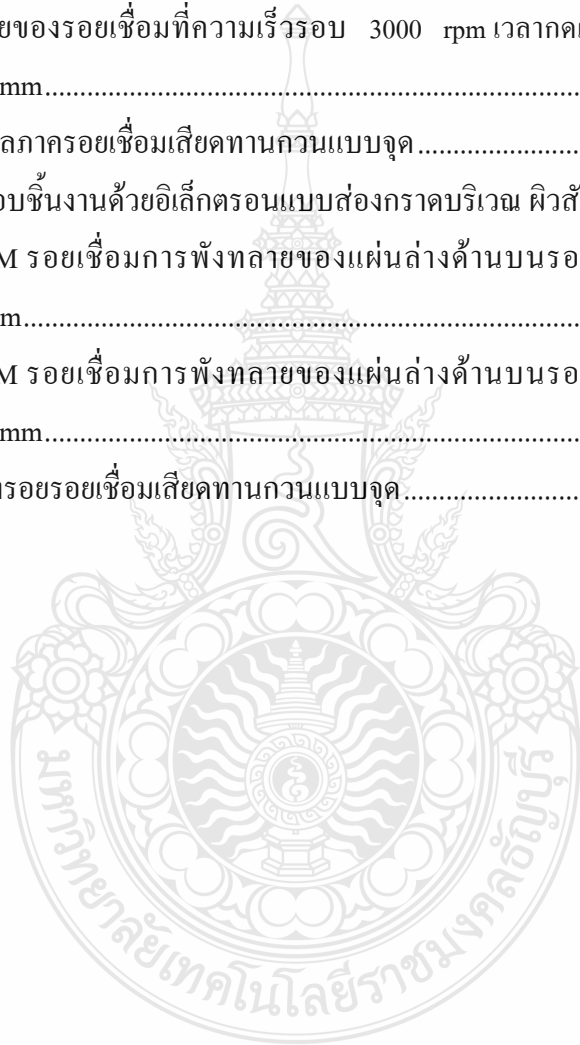
## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	ชิ้นงานเชื่อมความเร็วรอบตัวกวน 4,000 rpm เวลาทดสอบ 3 s อัตราการกด 8 mm/min.... 46
4.4	ผิวหน้ารอยเชื่อมความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm..... 47
4.5	โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm (ก) เวลาทดสอบ 2 s (ข) เวลาทดสอบ 3 s (ค) เวลาทดสอบ..... 47
4.6	ความสูงผิวสัมผัสคล้ายตะขอรอยเชื่อม ความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm ..... 48
4.7	รูปแบบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อม ..... 49
4.8	ผลกระทบของความเร็วรอบและเวลาทดสอบต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาทที่ความยาว ปลายตัวกวน 1 mm..... 50
4.9	การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 2 s ที่ความยาวปลาย ตัวกวน 1 mm..... 51
4.10	การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 3 s ที่ความยาวปลาย ตัวกวน 1 mm..... 51
4.11	โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เวลาทดสอบ 2-4 s กำลังขยาย 50 x..... 52
4.12	การเปรียบเทียบผิวหน้ารอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ความเร็วรอบ 3,000 rpm ..... 53
4.13	โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ..... 53
4.14	ความสูงผิวสัมผัสคล้ายตะขอ ความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 3,000 rpm ... 54
4.15	ผลกระทบของความเร็วรอบและเวลาทดสอบต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาทความยาว ปลายตัวกวน 1 mm..... 55
4.16	การพังทลายของรอยเชื่อมความเร็วรอบ 3000 rpm เวลาทดสอบ 2 s ความยาวปลาย ตัวกวน 1 mm ..... 56
4.17	การพังทลายของรอยเชื่อมความเร็วรอบ 3000 rpm เวลาทดสอบ 3 s ความยาวปลาย ตัวกวน 1 mm ..... 56
4.18	โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ความเร็วรอบตัวกวน 3,000 rpm กำลังขยาย 50 x..... 57
4.19	การเปรียบเทียบผิวหน้ารอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด..... 59
4.20	โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ..... 59
4.21	การเปรียบเทียบความสูงผิวสัมผัสคล้ายตะขอ ความยาวปลายตัวกวนต่างกัน ..... 59



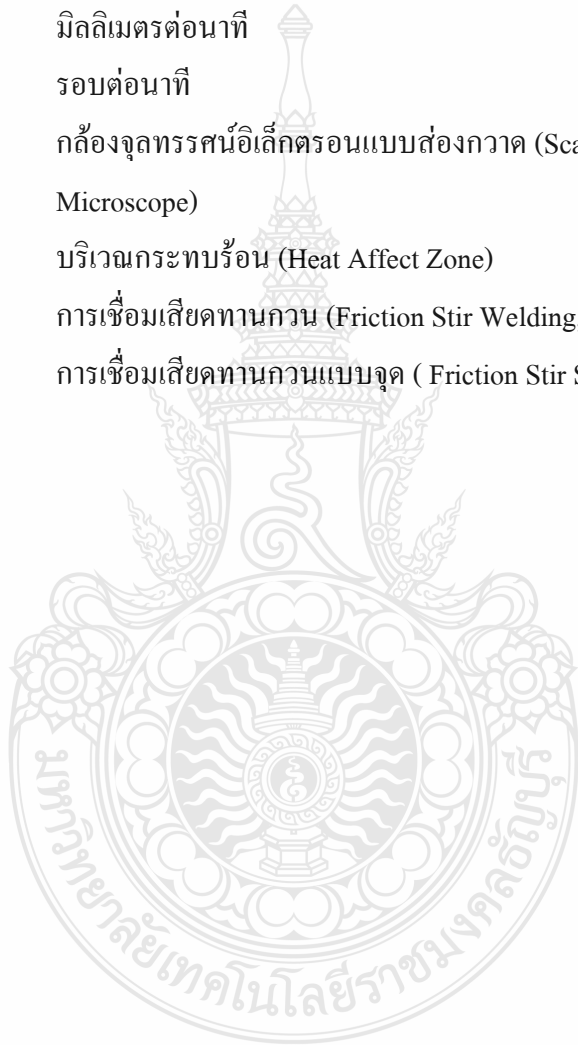
## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 การเปรียบเทียบความเร็วรอบและความยาวปลายตัวกวนต่อความแข็งแรงดึงที่เวลา กดแช่ 3 s.....	60
4.23 การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลากดแช่ 3 s ความยาวปลาย ตัวกวน 1.7 mm.....	61
4.24 การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 rpm เวลากดแช่ 3 s ความยาวปลาย ตัวกวน 1.4 mm.....	62
4.25 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด.....	63
4.26 การตรวจสอบชิ้นงานด้วยอิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณ ผิวสัมผัสคล้ายตะขอ.....	64
4.27 รูปถ่าย SEM รอยเชื่อมการพังทลายของแผ่นล่างด้านบนรอยเชื่อมความยาวปลาย ตัวกวน 1 mm.....	65
4.28 รูปถ่าย SEM รอยเชื่อมการพังทลายของแผ่นล่างด้านบนรอยเชื่อมความยาวปลาย ตัวกวน 1.4 mm.....	66
4.29 ค่าความแข็งรอยรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด.....	67



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Sec.	วินาที
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)
kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
mm	มิลลิเมตร
mm/min	มิลลิเมตรต่อนาที
rpm	รอบต่อนาที
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone)
FSW	การเชื่อมเสียดทานกวน (Friction Stir Welding,)
FSSW	การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ( Friction Stir Spot Welding,)



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน โลหะที่มีน้ำหนักเบา เช่น โลหะผสมอลูมิเนียม และ โลหะผสมแมกนีเซียม ถูกใช้มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์และการบินและอวกาศ [1] ซึ่งผู้ผลิตยานยนต์กำลังเผชิญปัญหาที่ท้าทายเกี่ยวกับการสร้างรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา ในความพยายามปรับปรุงการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง และลดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม วิธีการหนึ่งที่จะลดน้ำหนักโดยรวมของยานพาหนะคือการใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาในการออกแบบโครงสร้าง [2, 3] โลหะที่มีน้ำหนักเบาที่นิยมในการนำมาใช้ในโครงสร้างยานยนต์คือ อลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง ด้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ด้วยเหตุนี้ในโครงสร้างของรถยนต์และเครื่องบินจึงมีโลหะอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสำคัญ [4] ในภาคอุตสาหกรรมนั้นพบว่าวิธีการเชื่อมด้านทานแบบจุด (Resistance spot welding : RSW) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรม ยานยนต์ [5] อย่างไรก็ตาม วิธีการเชื่อมด้านทานแบบจุดแบบเดิม นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมโลหะที่มีน้ำหนักเบา เพราะข้อเสีย เช่น ค่าใช้จ่ายการลงทุนในการดำเนินงานสูง เนื่องจากต้องการความร้อนสูง และการนำไฟฟ้าของโลหะ ทำให้สูญเสียพลังงานค่อนข้างมาก ซึ่งจากการเชื่อมด้านทานแบบจุด ทำให้เกิดความร้อนสูงนั่นเองจึงส่งผลไม่ดีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม [2] ต่อมาได้มี การคิดค้นวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนโดย TWI (The Welding Institute) ของสถาบันวิจัยเทคโนโลยีของอังกฤษในปี ค.ศ.1991 และได้ถูกพัฒนาเป็นวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด (Friction stir spot welding : FSSW) โดยกลุ่ม Sumitomo Light Metal Industries ,Ltd., Mazda, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., and Norsk Hydro [5] ซึ่งวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด สามารถหลีกเลี่ยงการด้อยลงของสมบัติเชิงกลของโลหะเดิม อันเนื่องมาจากการหลอมละลาย และการแข็งตัวอีกครั้งของโลหะดังกล่าว จึงทำให้สามารถต่อชิ้นงานที่มีจุดหลอมละลายต่างกันหรือวัสดุต่างชนิดได้ [6]

งานวิจัยในปัจจุบันได้มีการนำเอาวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างๆ มากมาย เช่น ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด อลูมิเนียมผสมเกรด 5052 – H112 [7] ผลกระทบของรูปทรงเรขาคณิตเครื่องมือต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดของอลูมิเนียมผสมเกรด 6061 [8] สมบัติของวัสดุของการเชื่อม

ด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจตุรรอยต่อของอลูมิเนียมผสมเกรดต่างกัน คืออลูมิเนียมผสมเกรด 5052-H32 และอลูมิเนียมผสม เกรด 6061-T6 [9] ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อความแข็งแรงของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดโลหะแมกนีเซียมผสม AZ61 [10] ความสัมพันธ์ของโครงสร้างและปริมาณของความเค้นตกค้าง ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดโลหะแมกนีเซียมผสม AZ31 [11] การเลื่อนของเม็ดเกรนในระหว่างการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดของอลูมิเนียมผสมเกรด 2024 [12] การก่อตัวของรูปทรงคล้ายตะขอและคุณสมบัติเชิงกลโลหะแมกนีเซียมผสม AZ31 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด [13] อย่างไรก็ตาม กรณีการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 ยังไม่มีการรายงานไว้เป็นข้อมูลในงานวิจัย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้การเชื่อมการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรดต่างกันนี้

ข้อมูลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบและเวลาในการกดแซ่ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจตุรรอยต่อของ อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และ อลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 ที่ความหนา 1 mm โดยใช้ความเร็วรอบในการเชื่อมและเวลาในการกดแซ่ ความเร็วกด และศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงดึงแบบกากบาทของรอยเชื่อม เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรที่ผลต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ของรอยต่อของการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นทดสอบการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัตถุประสงค์การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 ความหนา 1 mm และแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 ความหนา 1 mm

1.3.2 เชื่อมรอยต่อของ โดยให้อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 อยู่ด้านบน และอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 อยู่ด้านล่าง โดยใช้เครื่องกัดอัดโนมัต ในการเชื่อมแล้วนำไปทดสอบค่าความแข็งแรงดึงแบบกากบาท (Cress-tension Test) ภายใต้อุณหภูมิมาตรฐาน JIS Z 3137

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อการรวมตัวระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 ประกอบด้วย

- ความเร็วรอบการหมุนตัวกวนที่ 2500, 3000 และ 3500 rpm
- เวลาทดสอบที่ 2, 3 และ 4 s
- ความยาวปลายตัวกวน 1, 1.4 และ 1.7 mm
- อัตราการป้อนตัวกวน 8 mm/min
- ระยะกดลึกลงจากปากตัวกวน 0.2 mm

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาท (Cress-tension Test) และการทดสอบความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อม

1.3.5 ศึกษาความสัมพันธ์ขนาดของแนวเชื่อมของพื้นที่ ที่เกิดการฉีกขาดกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาท

1.3.6 ศึกษาความสูงของผิวสัมผัสคล้ายตะขอบริเวณอินเทอร์เฟซของโครงสร้างจุลภาค เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแนวเชื่อมกับสมบัติทางกลของรอยต่ออลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052

1.3.7 ศึกษาความสูงของบริเวณอินเทอร์เฟซของโครงสร้างจุลภาค เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแนวเชื่อม กับสมบัติทางกลของรอยต่ออลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052

## 1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการกำหนดค่าตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่ทำให้เกิด ความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และอลูมิเนียมผสม AA5052

1.4.2 เป็นแนวทางในการศึกษากระบวนการเชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้ทำการศึกษา มาประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ในการประสานรอยต่อของวัสดุต่างชนิดต่อไป

1.4.4 พัฒนาองค์ความรู้พื้นฐานของการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด สำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อเป็นการจัดเตรียมข้อมูล วิธีการ และผลการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาครัฐกิจ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการผลิตได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงแบบกาทบาทของรอยต่อเคมีการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และ อลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 โดยมีหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 2.1 อะลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียม ภาษาอังกฤษสะกดได้ว่า Alumnium หรือ Aluminum ในอเมริกาเหนือ เป็นวัสดุกลุ่มโลหะนอกกลุ่มเหล็ก มีความเป็นมันวาว อ่อน มีจุดหลอมเหลว  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$  คัดได้ง่าย มีน้ำหนักเบา มีค่าความแข็งแรงสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีเนื่องจาก มีการสร้างผิวออกไซด์มาปิดผิวไว้ตลอดเวลา มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าได้ดี และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความสำคัญทางเศรษฐกิจทางด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีค่าความเค้นประมาณ  $90\text{ MPa}$  เป็นธาตุที่มีลักษณะอ่อน จึงสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย มีความแข็งแรงต่ำ และมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะในกลุ่มเหล็ก ซึ่งทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ เรียกว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ อยู่ที่ชั้นผิวของ อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีความสำคัญมากอะลูมิเนียมจึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ อะลูมิเนียมที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีทั้งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสมจากสมบัติดังกล่าว อะลูมิเนียมจึงสามารถแบ่งได้ดังนี้ [14]

##### 2.1.1 แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต

2.1.1.1 อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Aluminum) มีเปอร์เซ็นต์ของอะลูมิเนียมอยู่ถึง  $99.00\%$  มีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่อีก  $1\%$  เช่น เหล็กและซิลิกอน หรือไม่มีส่วนผสมอื่นๆ อยู่เลย อะลูมิเนียมชนิดนี้ใช้ในงานขึ้นรูปได้ดีสมบัติของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์คือ จะมีความเหนียวสูงมากทั้งนี้ก็เพราะว่า อะลูมิเนียมระบบผลึกเป็นแบบ FCC

2.1.1.2 อะลูมิเนียมผสม (Wrought Aluminum) คือ อะลูมิเนียมที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ตั้งแต่หนึ่งธาตุขึ้นไป อะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะได้หลายชนิด ธาตุที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียม ได้แก่ ทองแดง แมงกานีส แมกนีเซียม ซิลิกอน โครเมียม สังกะสี และนิเกิล โลหะที่ผสมทำให้มีความคงทนต่อแรงดึงสูง

2.1.1.3 อะลูมิเนียมหล่อ (Cast Aluminum) อะลูมิเนียมชนิดนี้ได้จากกรรมวิธีการหล่อ 3 แบบใหญ่ๆ คือ หล่อทราย หล่อแบบถาวร และหล่อแบบอัดฉีด (Die Cast)

### 2.1.2 แบ่งตามส่วนผสมทางเคมี

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminum Association of America) ได้มีการจัดแบ่งอะลูมิเนียมขึ้นรูปเป็นหมวดหมู่ตามส่วนผสมโดยใช้เลข 4 หลัก ดังนี้

2.1.2.1 เลขหลักที่หนึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงกลุ่มของโลหะผสมซึ่งมีอยู่ 9 กลุ่มตามตาราง 2.1 เช่น 1XXX แทนโลหะที่มีอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99.0 % โดยน้ำหนัก

2.1.2.2 เลขหลักที่สองใช้สำหรับกำกับเมื่อมีการดัดแปลงส่วนผสมของโลหะให้ผิดไปจากโลหะผสมดั้งเดิมตัวเลข 0 แสดงว่าเป็นโลหะผสมดั้งเดิมตัวเลข 1-9 แสดงว่าเป็นส่วนที่ได้จากการดัดแปลงให้ผิดไปจากเดิมเช่น 2024 (4.5 Cu, 1.5Mg, 0.5Si, 0.1 Cr) เทียบกับ 2218 (4.0 Cu, 2.0 Ni, 1.5 Mg, 0.2 Si) ซึ่งสังเกตได้ว่าโลหะ 2218 มีนิกเกิลผสมเพิ่มเติมเข้าไป

2.1.2.3 ตัวเลขหลักที่สามและหลักที่สี่ใช้แสดงชนิดย่อยๆ ของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันความแตกต่างนี้มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกันเช่น 2014 (4.4 Cu, 0.8 Si, 0.8 Mn, 0.4 Mg) และ 2017 (4.0 Cu, 0.8 Si, 0.5 Mn, 0.5 Mg, 0.1 Cr) เป็นต้น เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวหลักที่สามและหลักที่สี่จะแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่งที่ปรากฏภายหลัง 99 % เช่น 1060 และ 1080 หมายถึงอะลูมิเนียมขึ้นรูปที่มีอะลูมิเนียมอยู่ 99.60 % และ 99.80 % ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ตัวเลข 4 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมขึ้นรูป [14]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0%
2XXX	ทองแดง
3XXX	แมงกานีส
4XXX	ซิลิกอน
5XXX	แมกนีเซียม
6XXX	แมกนีเซียมและซิลิกอน
7XXX	ผสมสังกะสี
8XXX	ผสมธาตุอื่นนอกเหนือจากที่กล่าว
9XXX	ยังไม่มีกำหนดใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวเลขที่ใช้เป็นสัญลักษณ์ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักภายในอลูมิเนียมขึ้นรูป ซึ่งส่งผลให้สมบัติและการนำไปใช้งานของอลูมิเนียมแตกต่างกัน ดังต่อไปนี้ [14]

อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (สัญลักษณ์ 1XXX) มีความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมที่ 99.0% ถึง 99.9% อลูมิเนียมกลุ่มนี้ยังจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้สมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)

อลูมิเนียมผสมทองแดง (สัญลักษณ์ 2XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถทำการปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยการวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ ก็จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกลคือการย้ำหุค

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซีย (สัญลักษณ์ 3XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้

อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (สัญลักษณ์ 4XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (สัญลักษณ์ 5XXX) บางครั้งจะมีการเติม แมกนีเซียลงไปด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ด้วยการวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับเชื่อมเหมือนกับสัญลักษณ์ 4XXX นอกจากนี้ยังนำไปทำเป็นถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (สัญลักษณ์ 6XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยการวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถ



ในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

อลูมิเนียมผสมสังกะสี - แมกนีเซียม (สัญลักษณ์ 7XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมกนีเซียมเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโคโรเนียมอีกเล็กน้อย อลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอลูมิเนียมชนิดนี้โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและกำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

อลูมิเนียมผสมธาตุอื่น (สัญลักษณ์ 8XXX) สงวนไว้สำหรับการผสมกับธาตุอื่นๆ นอกเหนือจากที่ใช้สำหรับประเภท 2XXX ถึง 7XXX เหล็ก และนิกเกิลถูกใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยไม่มีการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้า และถูกใช้อย่างแพร่หลายเช่น อัลลอยด์ตัวนำ 8017 อลูมิเนียม-ลิเทียม อัลลอยด์ 8090 มีความแข็งแรง และความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษ เพราะถูกพัฒนาให้ใช้กับงานอากาศยาน และอลูมิเนียมอัลลอยด์ ในประเภท 8000 สอดคล้องกับของระบบ Unified Numbering A9 8XXX

กรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้กับอลูมิเนียมผสมนี้เป็นกระบวนการเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมผสมโดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานและได้กำหนดสัญลักษณ์ตัวอักษรตามหลัง เพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้นๆ ซึ่งความหมายของสัญลักษณ์และการใช้งานดูได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ที่กำหนดกรรมวิธีทางความร้อนของอลูมิเนียม [14]

สัญลักษณ์	ความหมาย
F	ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนหรือทางกลยังคงอยู่สภาพเดิม ผ่านการขึ้นรูปตามปกติ เช่น งานหล่อ หมายถึง สรูปที่ได้จากการหล่อ
O	สภาพการอบอ่อน สภาพการอบทำให้เกิดผลึกใหม่ (Annealed) เป็นการอบคลาย ทำให้อ่อนด้วยการอบอ่อน หรือการอบทำให้เกิดผลึกใหม่ทำให้มีสมบัติด้านความอ่อน และเหนียว มักจะใช้กับงานขึ้นรูปเย็น
H	ทำให้มีความแข็ง ที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็นใช้กับงานที่ต้องการ เพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้น โดยการแปรรูปเย็นอาจจะมีกรรมวิธีทางความร้อนควบคู่กันไปด้วย และ H ต้องตามด้วยตัวเลขตัวเดียวหรือหลายตัว ซึ่งตัวเลขแสดงถึงการกำหนดในการผลิต
H1	ผ่านการทำให้แข็ง โดยการขึ้นรูปเย็นอย่างเดียวเป็นการผ่านกระบวนการแปรรูปเย็นอย่างเดียว มีตัวเลขตัวที่สองกำกับอยู่ด้วยจะแสดงความรุนแรงของการแปรรูป ความรุนแรงของการแปรรูป วัดด้วยปริมาณของการแปรรูป ในบางครั้งอาจมีตัวเลขตัวที่สามกำกับไว้ เพื่อบอกถึงการควบคุม การอบคลาย หรือระบุถึงสมบัติทางกลพิเศษ
H2	ผ่านการทำให้แข็งโดยการแปรรูปเย็น แล้วทำการอบคลายใช้กับงานแปรรูปเย็น เพื่อต้องการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ เกินกว่าระดับที่ ต้องการเล็กน้อย ต่อจากนั้นจึง นำไปอบคลาย จะเห็นว่าความแข็งแรง จะถูกลดลงระดับหนึ่ง แต่ยังคงมีปริมาณการแปรรูปเย็น ยังคงเหลืออยู่ การกำหนดตัวเลข จะกำหนด เช่นเดียวกับ H1
H3	เพิ่มความแข็งโดยการแปรรูปเย็น และทำให้เสถียรภาพใช้กับงานที่ ผ่านการแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ จากนั้นนำไปทำกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้โลหะคงรูป ความร้อนที่ให้นี้ยังไม่มากพอที่จะลดความเครียดทำให้มีความเค้น
W	สภาพไม่คงรูปหลังทำการอบด้วยความร้อนของสารละลายของแข็งใช้กับโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่สามารถแตกตัวขึ้นได้เองเท่านั้น หมายถึงหลังจากทำกรรมวิธีให้ความร้อน เพื่อให้เกิดการละลายตัวของธาตุผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน กับอะลูมิเนียม จากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโลหะชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลง (ทางโครงสร้าง) ตลอดเวลาที่ทิ้งไว้ในอากาศ ดังนั้นจึงต้อง ระบุเวลาหลังกรรมวิธี การให้ความร้อน กำกับไว้ด้วย

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ที่กำหนดกรรมวิธีทางความร้อนของอลูมิเนียม (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
T	เป็นการปฏิบัติการทางความร้อน เพื่อให้โลหะคงรูป เนื่องจาก F, O หรือ H ใช้กับโลหะที่ ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งอาจทำร่วมกับกรรมวิธีทางกลด้วยหรือไม่ก็ได้ ซึ่งทำให้ชิ้นงานเสถียรภาพ การอบคลาย ใช้อักษรตัว T ตามด้วยเลข 2 ถึง 10 เป็นข้อกำหนด ของการทำงาน เพื่อเปลี่ยนสภาพของชิ้นงาน แตกต่างกันออกไป โดยการเติมตัวเลข ตัวเดียว หรือ หลายตัวก็ได้
T2	การอบอ่อนใช้สำหรับงานหล่อเท่านั้นเป็นการอบอ่อน เพื่อให้โลหะเกิดการอ่อนตัว ทำให้เหนียวขึ้นใช้กับงานที่ได้จากการหล่อ
T3	การอบละลาย และการแปรรูปเย็นเป็นภาวะโลหะภายหลังการทำอบละลาย ต่อจากการทำแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ
T4	การอบละลายและ การเองจิ้งได้เองจนอยู่ในสภาพคงรูปใช้กับโลหะที่ทำการอบละลายแล้ว ต่อจากนั้นทิ้งไว้จนเกิด การเองจิ้งทำให้เกิดความแข็ง และเกิดการคงรูป
T5	การเองจิ้งโดยกรรมวิธีทางความร้อนใช้กับโลหะที่ผ่านการทำกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้เกิดการเองจิ้งโดยไม่ต้องทำการอบละลายมาก่อน
T6	การอบละลาย แล้วอบแช่ (เองจิ้งเทียม) ใช้กับโลหะที่ผ่านการอบละลาย ต่อจากนั้นใช้กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เกิดการเองจิ้งเทียม
T7	การอบละลาย และให้มีเสถียรภาพ ใช้กับโลหะที่ผ่านการอบละลายโดยมีการควบคุม ทั้งอุณหภูมิ และเวลา เพื่อควบคุมการโตของเกรนหรือช่วยควบคุมความเค้นตกค้างในเกรนที่หลงเหลืออยู่ใน โลหะหรือควบคุมทั้งสองอย่าง
T8	การอบละลายแล้ว แปรรูปเย็น และอบบ่มตัวแข็ง ใช้กับ โลหะที่ผ่านการอบละลาย เพื่อให้โลหะเหนียวขึ้น จากนั้นจึงทำการแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงวัสดุขึ้นอีก โดยการบ่มตัวแข็ง
T9	การอบละลาย แล้ว อบบ่มตัวแข็ง และแปรรูปเย็น ใช้กับ โลหะที่ผ่านการอบละลาย แล้วทำการอบบ่มแข็ง จากนั้นจึงทำการแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ
T10	การอบบ่มตัวแข็ง แล้ว ทำการแปรรูปเย็น ใช้กับโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้เกิดการอบบ่มแข็งโดยไม่ผ่านการอบอ่อนมาก่อน ต่อจากนั้นทำการแปรรูปเย็นอีกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ

2.1.3 อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 สมบัติต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีของอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 [14]

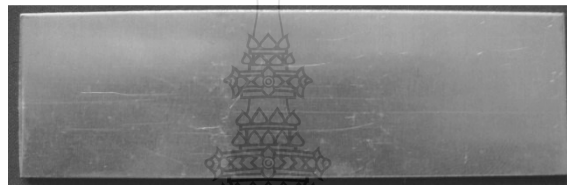
ธาตุประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (%)
อะลูมิเนียม(Al)	99.00
ทองแดง (Cu)	0.07
เหล็ก(Fe)	0.35
สังกะสี(Zn)	0.1
แมกนีเซียม(Mg)	0.05
ซิลิกอน(Si)	0.25
แมงกานีส(Mn)	0.05
อื่น ๆ	0.13

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 [14]

สมบัติทางกายภาพ	ผลของสมบัติทางกายภาพ
อุณหภูมิหลอมเหลว	657°C
อุณหภูมิแข็งตัว	643°C
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20 องศาเซลเซียส	23.6 um/m.K
ปริมาตร	$68 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{K}$
ความร้อนจำเพาะ	904 J/kg.K
ความสามารถในการนำความร้อน O temper	222 W/m.K
ความหนาแน่น	2.71g/cm <sup>3</sup>

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 [14]

Alloy and temper	Ultimate Tensile strength (MPa)	Tensile yield strength (MPa)	Hardness (HB)	Ultimate shearing strength (MPa)
1100-O	90	35	23	60
1100-H12	110	105	28	70
1100-H14	125	115	32	75
1100-H16	145	140	38	85
1100-H18	165	150	44	90



รูปที่ 2.1 อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100

2.1.4 อลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 มีสมบัติต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่/2.6 สมบัติทางเคมีของอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 [14]

ธาตุประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (%)
อะลูมิเนียม(Al)	96.3
ทองแดง (Cu)	<0.024
เหล็ก(Fe)	0.360
สังกะสี(Zn)	<0.01
แมกนีเซียม(Mg)	2.897
ซิลิกอน(Si)	0.147
แมงกานีส(Mn)	0.036
อื่น ๆ	

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 [14]

สมบัติทางกายภาพ	ผลของสมบัติทางกายภาพ
อุณหภูมิหลอมเหลว	649°C
อุณหภูมิแข็งตัว	607°C
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20 องศาเซลเซียส	23.8 um/m.K
ปริมาตร	$69 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{K}$
ความร้อนจำเพาะ	900 J/kg.K
ความสามารถในการนำความร้อน O temper	222 W/m.K
ความหนาแน่น	2.68 g/cm <sup>3</sup>

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 [14]

Alloy and temper	Ultimate tensile strength (MPa)	Tensile yield strength (MPa)	Hardness (HB)	Ultimate shearing strength (MPa)
5052-O	195	90	47	125
5052-H32	230	195	60	140
5052-H34	260	215	68	145
5052-H36	275	240	73	160
5052-H38	290	255	77	165



รูปที่ 2.2 อลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052

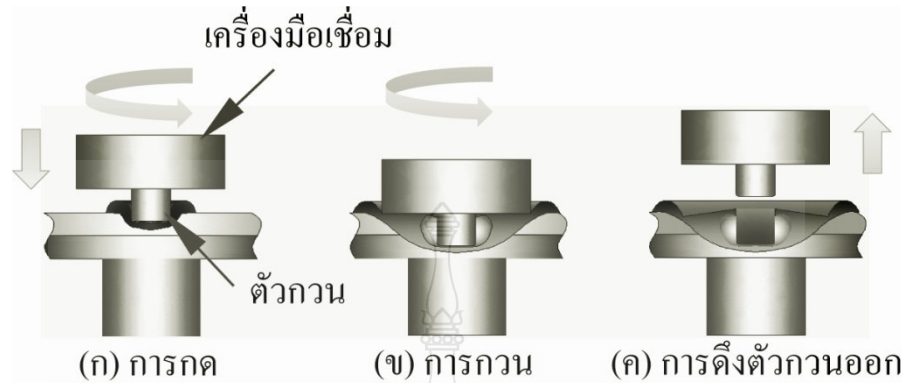
## 2.2 ขั้นตอนการเชื่อม (Welding)

การเชื่อม (Welding) เป็นกระบวนการต่อโลหะให้ติดกัน โดยอาศัยความร้อนมาหลอมเหลวจนงานเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะใช้แรงกดหรือไม่ใช้ก็ได้ จะเติมลวดเชื่อมหรือไม่เติมก็ได้ การเชื่อมสามารถทำได้หลายกระบวนการเริ่มจากแหล่งความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมซึ่งมีมากมาย เช่น ความร้อนจากเปลวไฟ หรือจากกระแสไฟฟ้า การใช้แรงกดก็เช่นกัน กระทำได้หลายกระบวนการ เช่น การตีเหล็ก การเชื่อมจุด นอกจากนี้ลวดเชื่อมยังมีหลายประเภทที่เป็นตัวแบ่งชนิดกระบวนการ เช่น ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบัน ความเจริญก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมทำให้เกิดกระบวนการเชื่อมชนิดต่าง ๆ ขึ้นอีกมากมายเพื่อนำมาใช้เชื่อมต่อโลหะชิ้นงานให้ได้ประสิทธิภาพและเหมาะสมกับลักษณะงานประเภทต่างๆ [15] ซึ่งการเชื่อมสามารถจำแนกได้เป็นสองชนิด คือ การเชื่อมแบบหลอมเหลว (Fusion Welding) คือ การประสานโลหะสองชิ้นให้รอยต่อเกิดเป็นแนวเชื่อมติดเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแนวประสานโดยใช้ความร้อนและลวดเชื่อมเติมเนื้อประสาน การเชื่อมอาจจะใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานหรืออาจจะไม่ใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานก็ได้ นอกจากนี้ยังจำแนกชนิดการเชื่อมได้ตามลักษณะของพลังงานความร้อนที่นำมาใช้เชื่อมตามลักษณะของม่านแก๊สที่ปกคลุมบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมขณะโลหะหลอมเหลวไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศได้ การเชื่อมอีกชนิดก็คือการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) คือ การประสานโลหะสองชนิดให้ติดกันโดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโดยอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเช่นการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding :RSW ) การเชื่อมจากเปลวแก๊ส (Gas PressWelding) การเชื่อมจากสารเคมีพร้อมแรงอัดไม่ใช้ความร้อนเช่นการเชื่อมอัดเย็น (ColdPress Welding) และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด(Friction Spot Joining: FSJ) เป็นต้น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ เป็นการเชื่อมชนิดการเชื่อมในสภาวะของแข็ง การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด จึงขอกล่าวถึงการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เพียงอย่างเดียว

### 2.2.1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด (Friction Stir Spot Welding: FSSW)

การเชื่อมเสียดทานกวน (Friction Stir Spot Welding: FSSW) เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง ถูกพัฒนามาจากการเชื่อมเสียดทานกวน (FSW) เพื่อทดแทนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (RSW) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าและต้นทุนในการเชื่อมที่สูงเป็น หลักการในการเชื่อม คือตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วสูง สอดเข้าไปในโลหะเชื่อมของแผ่นวัสดุ ทำให้เกิดความร้อนเสียดทานภายใต้บาเครื่องมือและทำให้วัสดุอ่อนตัวลง วัสดุที่อ่อนตัวจะถูกดันให้เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวน และเมื่อเครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่บาเครื่องมือเชื่อมจะกดและอัดวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุเป็นแนวเชื่อม [18] โรงงานผลิตรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น

ได้แก่ กลุ่มบริษัทมาสด้า และบริษัทอุตสาหกรรมหนักวาซาคิ จึงได้พัฒนากรรมวิธีการนี้ขึ้นมา เช่น ในโครงสร้างของรถยนต์มาสด้า รุ่น RX-8 หรือ รุ่น Loadstar เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมแรงเสียดทานกวนแบบจุด [7]

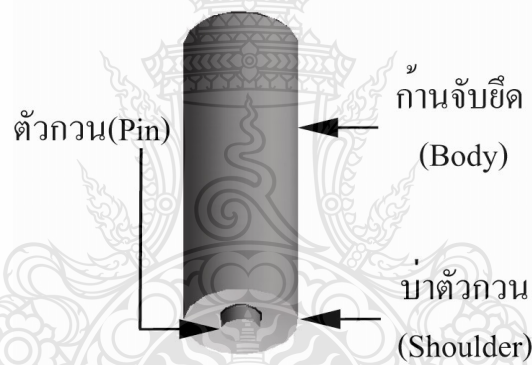
การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดนี้ เป็นการเชื่อมวัสดุในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) มีกระบวนการเชื่อมพื้นฐาน ดังรูปที่ 2.3 เครื่องมือเชื่อมที่ประกอบไปด้วย ตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วที่กำหนดและถูกกดลงไปในรอบต่อทำให้เกิดการอ่อนตัวโดยความร้อนจากการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม ดังรูปที่ 2.3(ก) จนกระทั่งปลายของตัวกวนถูกสอดเข้าไป ในระยะที่กำหนด การเสียดทานบริเวณผิวเครื่องมือ ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและด้วยแรงกดจากเครื่องมือจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไหลวนภายในรอยเชื่อมหรือการกวน เนื่องจากการกวน ดังรูปที่ 2.3 (ข) ทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุเชื่อมบริเวณรอยต่อ ซึ่งตัวกวนนี้จะถูกสอดอยู่ตามระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นตัวกวนจะถูกยกขึ้น ดังรูปที่ 2.3 (ค) และทำให้เกิดเป็นรอยต่อขึ้น [7] ดังนั้น ตัวแปรต่าง ๆ ของการเชื่อมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงของตัวแปรการเชื่อมต่าง ๆ ประกอบไปด้วย

### 2.2.2 เครื่องมือเชื่อม (ตัวกวน)

การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อุปกรณ์ที่มีความสำคัญ และเป็นตัวกลางในการเสียดทานทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นระหว่าง ชิ้นงานทั้งสองได้แก่ เครื่องมือเชื่อมหรือที่เรียกว่า ตัวกวน หน้าที่หลักของตัวกวนคือเป็นผิวสัมผัสกับวัสดุชิ้นงาน โดยการเสียดทานทำให้เกิดความร้อน และเกิดการรวมตัวของวัสดุรอบรอยต่อในแนวเชื่อมเข้าด้วยกัน ดังนั้นตัวกวนจึงจำเป็นต้องทนต่อความร้อนสูงได้โดยไม่เปลี่ยนรูป หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งลักษณะของตัวกวนที่ผ่านมาจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลม โดยมีปากของเครื่องมือ (Tool Shoulder) เป็นตัวสัมผัสกับผิวชิ้นงานด้านบนทำหน้าที่กดและเสียดทานเนื้อ



ของวัสดุจนเกิดความร้อนจากการเสียดทาน จึงทำให้วัสดุผสมติดกัน และมีตัวกวน (Pin) ที่เข้าไปอยู่ในเนื้อของชิ้นงานทำหน้าที่กีดและกวนเนื้อภายในของวัสดุ ทำให้เกิดความร้อนการอ่อนตัวเกิดการหลอมผสมติดกันระหว่างวัสดุทดสอบ ขณะเดียวกันก็สร้างความแข็งแรงของแนวการเชื่อมภายในเนื้อวัสดุไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้ได้ตัวกวนที่เป็นเหล็กกล้าที่คงรูปร่างเดิมได้ดีหลังจากการชุบแข็ง และมีความเหนียวที่ดี ในงานวิจัยนี้เหล็กกล้า JIS SKD11 จึงได้ถูกใช้เป็นตัวกวน เหล็กกล้า JIS SKD11 เป็นเหล็กกล้า ที่มีความแข็งแรงสูง เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ ชนิดไฮคาร์บอน ไฮโครเมียม (12 % โครเมียม) ลักษณะเด่นของเหล็กกล้า JIS SKD11 คือ มีความทนต่อการสึกหรอได้ดี และรักษาคมตัดได้ดีเยี่ยม รวมทั้งมีความคมเหนียวแน่นสูง มีความแข็งแรงมากเมื่อผ่านการชุบแข็ง ชุบแข็งง่าย สามารถชุบ Nitriding ได้ทนต่อการเสียดสีสูง ซึ่งโดยรวมแล้วเหล็ก JIS SKD11 จะประกอบด้วย ส่วนผสมหลัก โดยประมาณดังนี้ คือ C1.5 %, CR12 %,Mo0.9-1 %, V0.8-1 % และสัดส่วนธาตุอื่นที่เป็นธาตุรอง คือ Mn0.4 %, Si 0.4 – 0.5 %

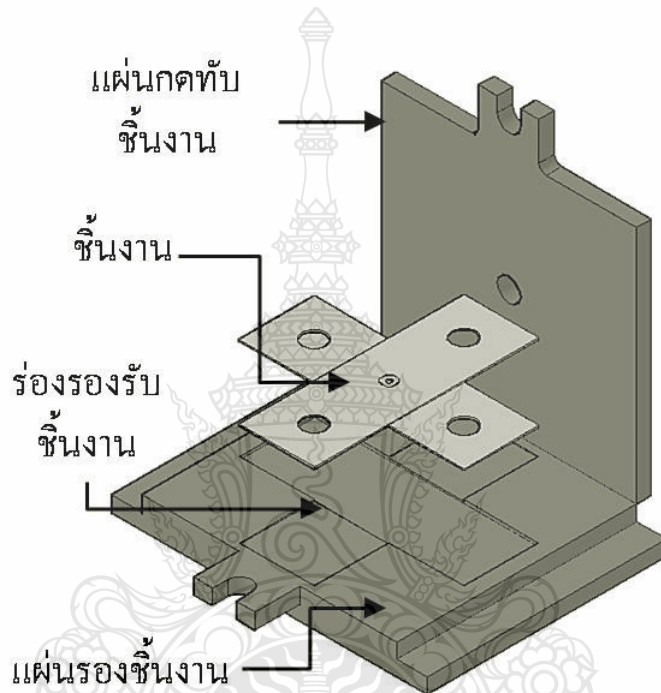


รูปที่ 2.4 รูปทรงเครื่องมือเชื่อม

### 2.2.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการยึดจับชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นแบบแผ่นจับยึด และแบบหนีบยึดจับชิ้นงานให้ติดแน่นอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการอย่างเที่ยงตรง และอยู่ในตำแหน่งดังกล่าวโดยสามารถต่อต้านแรงที่เกิดจากเครื่องมือตัดที่กระทำต่อชิ้นงานได้เป็นอย่างดี ซึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานครั้งนี้ประกอบด้วย แผ่นรองชิ้นงานคือ ส่วนที่มีหน้าที่รองรับแรงกดจากเครื่องกัด และความร้อนจากการ เสียดสีในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด จึงจำเป็นต้องเป็นวัสดุที่สามารถรองรับแรงกดได้ดี และสามารถทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูงได้ จึงควรทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ เพราะจะทำให้ไม่เสียรูปทรงในระหว่างการเชื่อม และหลังการเชื่อมซึ่งแผ่นรองชิ้นงานนั้นมีหน้าที่ในการรองรับชิ้นงานในขณะที่ทำการเชื่อม เพื่อให้ชิ้นงานในการเชื่อมทุกชิ้นอยู่ในตำแหน่ง

เดียวกันทุกชิ้น จึงออกแบบเป็นร่องรูปกากบาทขนาดพอดีกับชิ้นงานเชื่อม และที่สำคัญควรออกแบบให้สามารถจับยึดกับโต๊ะจับยึดชิ้นงานให้มีความมั่นคงมากที่สุด เพราะเมื่อทำการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดนั้น จะเกิดแรงบิดขึ้นที่ชิ้นงานอาจส่งผลให้แผ่นรองเกิดการเคลื่อนที่ได้ แผ่นกดทับชิ้นงานจะต้องเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อสภาวะแรงกด และอุณหภูมิที่สูงได้ ไม่เสียภาพทรงในระหว่างการเชื่อมและหลังการเชื่อม ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ มีหน้าที่ในการกดทับ เพื่อให้สามารถจับยึดชิ้นงานได้แน่นและมั่นคงมากขึ้น เพื่อให้ง่ายและรวดเร็วในการทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในกระบวนการเชื่อม

### 2.3 การทดสอบชิ้นทดสอบ

การทดสอบถ้ำในแง่ของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบแบบไม่ทำลาย NDT (Nondestructive Testing) และการทดสอบแบบทำลาย DT (Destructive Testing) การทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานจะไม่แตกหักเสียหาย ในขณะที่การทดสอบแบบทำลาย ชิ้นทดสอบจะแตกหักเสียหายภายหลังการทดสอบ ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการทดสอบแบบไม่ทำลายก็เพื่อหาสิ่งบกพร่องที่ผิว และภายในส่วนวัตถุประสงค์หลักของการทดสอบแบบทำลายคือ เพื่อหาคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การทดสอบแรงดึง การทดสอบความแข็ง การทดสอบตีกระแทก การทดสอบความล้า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เป็นต้น [16]

### 2.3.1 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงนั้นเป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุที่อยู่สภาวะแรงดึงตามแนวแรง จัดว่าเป็นการทดสอบแบบทำลายเพราะโดยทั่วไปชิ้นงานจะถูกดึงให้ขาดออกจากกันหรือถ้าดูตามลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบ ก็จัดว่าเป็นการทดสอบแบบแรงคงที่ (Static Load Testing) การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบวัสดุที่สำคัญที่สุด ทั้งนี้เพราะในการออกแบบส่วนใหญ่จะใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการทดสอบแรงดึง เพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ความเค้น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ เป็นต้น [16] ซึ่งสามารถหาความเค้นดึง [17] ได้ดังสมการ ต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 ทิศทางแรงดึง [17]

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้นที่เกิด  
 $F$  คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุ  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด  $A$  ตั้งฉากกับแนวแรง  $F$

#### 2.3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องทดสอบแบบยูนิเวอร์แซล สามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามหลักการของการให้แรงแก่เครื่องทดสอบได้แก่

1) เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฮดรอลิก ในเครื่องทดสอบประเภทนี้จะใช้แรงดันน้ำมันจากถังพักน้ำมันไฮดรอลิก เพื่อมาขับเคลื่อนครอสเสดให้เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้ง เป็นผลให้เกิดแรงดึงในชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากแรงดันในการขับเคลื่อนมาจากแรงดันไฮดรอลิก จึงสามารถให้แรงดันที่สูงและการเปลี่ยนขนาดของแรงดันที่รวดเร็วขึ้น

สามารถกระทำทำให้สามารถทดสอบแรงดึงได้ที่แรงดึงสูงๆ โดยอาจมีค่าแรงดึงสูงสุดได้ถึง 500 ตัน โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องทดสอบประเภทนี้กับการทดสอบงานประเภทพลวัต (Dynamic test) หรือการทดสอบที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงแรงดึงอย่างรวดเร็ว เครื่องทดสอบประเภทนี้จะต้องมีเสาต้านข้าง (Column) ที่แข็งแรงมาก

2) เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ขับเคลื่อนด้วยการเคลื่อนที่ของสกรู สำหรับเครื่องทดสอบประเภทนี้ใช้การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีแรงบิดสูง (High-torque motor) ที่ส่งแรงผ่านเฟืองและสายพานในตัวเครื่องให้ผ่านไปที่ระบบสกรูเพื่มาขับเคลื่อนครอสเฮด เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง ด้วยอัตราเร็วคงที่ส่งผลให้เกิดแรงดึงในชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ในการขับเคลื่อนจึงทำให้มีแรงดึงที่ไม่สูงมากและการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดึงก็ไม่รวดเร็วเมื่อเทียบกับการขับเคลื่อนที่มาจากแรงดันน้ำมัน โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องทดสอบประเภทนี้กับการทดสอบชิ้นงานที่รับแรงกระทำแบบสถิต (Static) หรือการทดสอบที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงแรงดึงอย่างรวดเร็ว เครื่องทดสอบประเภทนี้จะต้องมีสกรูขับเคลื่อนเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงเรียกว่า เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฮดรอลิก (Universal Testing Machine) ซึ่งเครื่องมือนี้จะมีปากจับอยู่ 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ยึดติดกับแท่นเครื่อง ส่วนที่ 2 ยึดติดกับตัววัดแรง และสามารถเคลื่อนที่ได้ ในการทดสอบนั้น จะต้องนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ จับด้วยปากจับทั้งสองข้าง โดยระยะห่างระหว่างชิ้นทดสอบจะต้องเตรียมให้ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการทำการทดสอบ แล้วทำการถือค้ำให้แน่น หลังจากนั้นทำการดึงให้ปากจับส่วนที่ 2 ห่างออกไปส่วนปลายอีกข้างยึดแน่นอยู่กับที่ ชิ้นทดสอบจะมีแรงต้านทานและเกิดการยืดออกจนกระทั่งงานขาดออกจากกัน ซึ่งมีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงที่ได้ทำการดึงออกมาได้ซึ่งมีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg) หรือ นิวตัน (N) ซึ่งผลของแรงที่เกิดขึ้น ก็คือ ชิ้นทดสอบทนแรงดึงได้เท่ากับแรงต้านของวัสดุที่ทนได้ก่อนขาดออกจากกัน ในการทดสอบชิ้นทดสอบจะต้องยึดตามมาตรฐาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ยึดการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ JIS Z 3137 โดยมีขนาดความยาวของชิ้นทดสอบดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ขนาดชิ้นทดสอบการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ [18]

ความหนา (ม.ม.)	ความกว้างชิ้นทดสอบ (ม.ม.)	พื้นที่เกย (ม.ม.)	ความยาวชิ้นทดสอบ (ม.ม.)
$t \leq 5$	50	50x50	150
$t \geq 5$	75	75x75	200

### 2.3.2 การทดสอบความแข็ง

ความแข็งของวัสดุ นับเป็นสมบัติทางกลที่สำคัญค่าหนึ่ง เพราะสามารถใช้เป็นตัวชี้ให้เห็น ถึงสมบัติด้านอื่นของวัสดุ เช่น การทนต่อการสึกหรอ ความแข็งแรง ทั้งนี้ ค่าความแข็งของวัสดุขึ้นกับส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค การขึ้นรูป และกรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุ การจะทราบว่าวัสดุนั้นแข็งหรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบ ความแข็ง ซึ่งชนิดการทดสอบความแข็งมีความหมายในงานวิศวกรรม คือ ความแข็งของวัสดุต่างๆ ที่จะนำมาวัดหาค่าความแข็งได้โดยความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่าง หรือ ความต้านทานต่อการขีดข่วน [24] การทดสอบความแข็งมีหลายวิธี ซึ่งวิธีที่เป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติและได้กำหนดไว้เป็นมาตรฐานของแต่ละประเทศ ได้แก่ การทดสอบความแข็งแบบ บริเนลล์ (Brinell) แบบรอกเวลล์ (Rockwell) แบบวิกเกอร์ส (Vicker) ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส จึงลงรายละเอียดเพียงวิธีการทดสอบ ความแข็งแบบวิกเกอร์ส

2.3.2.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) เป็นวิธีการใช้ลูกบอลทรงกลมทำจากเหล็กชุบแข็ง กดลงบริเวณผิวชิ้นงานทดสอบลักษณะราบเรียบ ให้ได้รอยกดบนบนผิวชิ้นงาน จากนั้นจะทำการทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดแล้วทำการคำนวณหน่วยเป็น HB

2.3.2.2 การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) เป็นการทดสอบความแข็งด้วยการใช้หัวกด หรือหัวทดสอบ ที่เป็นเพชรรูปกรวย ข้อดีของการทดสอบความแข็ง แบบรอกเวลล์เมื่อเปรียบเทียบกับแบบบริเนลล์และแบบวิกเกอร์ส การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์จะมีความเร็วกว่า ข้อเสียของการทดสอบความแข็ง แบบรอกเวลล์ คือความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องมีไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด

2.3.2.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Test) การทดสอบความแข็ง วิกเกอร์ส เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิด ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายหัวกด  $136^\circ$  ดังรูปที่ และน้ำหนักกดที่ใช้ จะอยู่ระหว่าง 1-120 kg โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 kg การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกัน กับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของ รอยกด และจากรูปที่ สามารถหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส ได้ดังสมการ ต่อไปนี้ [19]

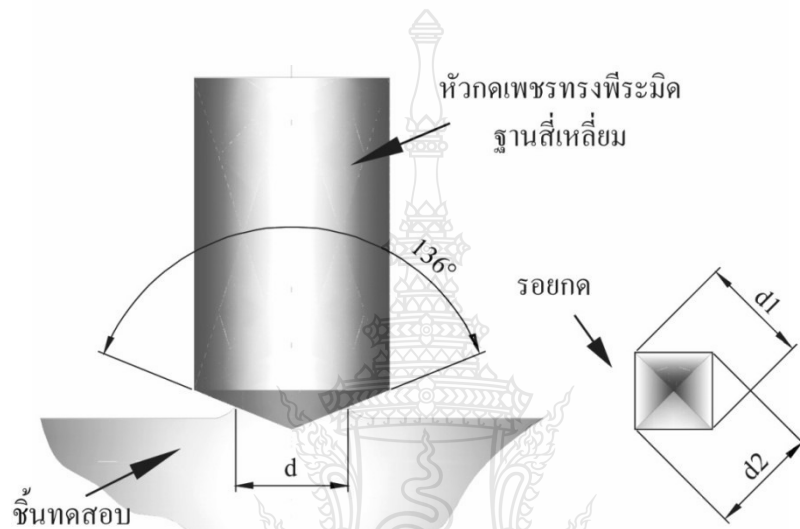
$$\text{จะได้ } HV = \frac{(2P \sin(\frac{\alpha}{2}))}{d^2}$$

$$= \frac{1.8544P}{d^2}$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักกด (kgf)

d คือ ความยาว เส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm)

$\alpha$  คือ มุมหัวกดเพชรรูปพีระมิด =  $136^\circ$



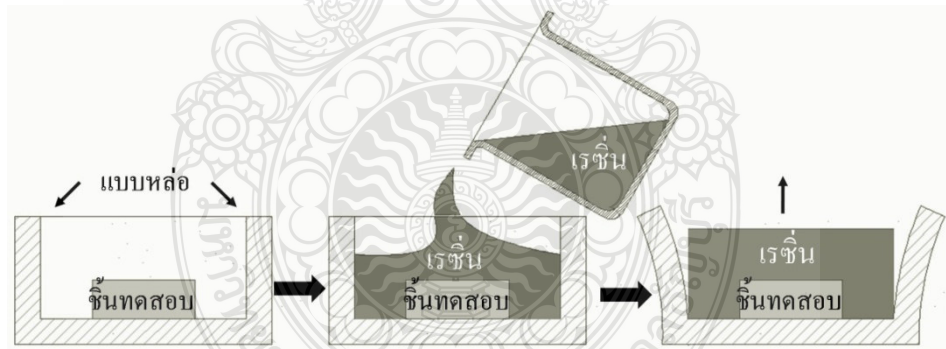
รูปที่ 2.7 หัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง แบบวิกเกอร์ส

### 2.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ของชั้นทดสอบ

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของชิ้นงานมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมบูรณ์ของแนวเชื่อมบริเวณที่มีการรวมตัวของโลหะชิ้นงาน ทำให้เห็นภาพโดยรวมของชิ้นงาน เพื่อเป็นข้อมูลในการควบคุมคุณภาพชิ้นงาน ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นทำการตรวจสอบโดยใช้กำลังขยายต่ำกว่า 25 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (Microstructure) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานที่มีกำลังขยายสูงกว่า 25 ถึง 1,000 เท่า ทำให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะทำได้กับชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียด ขัดมันและกัดกรดมาแล้ว ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจึงต้องมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทั้งนี้ควรเลือกวิธีให้เหมาะสมกับวัสดุและโครงสร้างที่ต้องการตรวจสอบและวิเคราะห์ ดังนั้นในการเตรียมชิ้นทดสอบก่อนทำการตรวจสอบโครงสร้าง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมชิ้นทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.3.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

การเลือกและการตัดชิ้นทดสอบ ควรเลือกให้ตัวอย่างให้เหมาะสม เพื่อให้การวิเคราะห์ไม่ผิดพลาด ชิ้นทดสอบที่ถูกตัดจะต้องสามารถนำผิวตัดไปทำการขัดแต่งต่อไป ควรหลีกเลี่ยงการที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติ ได้แก่ การร้าวหรือการขยายตัวของรอยร้าว และการแตกหัก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื่องจากความร้อน ซึ่งได้แก่ การคืนรูปผลึก การคืนตัว และการหลอมละลาย โดยปกติสามารถป้องกันได้โดยการหล่อเย็นด้วยน้ำ น้ำมัน อากาศเฉื่อย ซึ่งโดยทั่วไปชิ้นทดสอบมักมีขนาดเล็ก บางครั้งมีลักษณะอ่อน เปราะหรือมีรูพรุน ทำให้ไม่สะดวกในการจับยึดชิ้นทดสอบ ส่วนใหญ่จะทำการจับยึดชิ้นงานหลังการตัดหรือทำการหล่อแบบเย็น ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะถูกวางไว้ในแบบหล่อแล้วจากนั้นจึงเทวัสดุหล่อ เช่น เรซินหรือพลาสติก ลงในแบบและต้องทิ้งไว้ให้วัสดุหล่อแข็งตัว ซึ่งใช้เวลานานหลายชั่วโมงจึงเป็นข้อเสียของวิธีดังกล่าวส่วนข้อดีก็คือลงทุนต่ำ ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องจับยึดชิ้นทดสอบแบบร้อน (Hot Mounting Machine) ชิ้นทดสอบจะถูกวางไว้ในเบ้าซึ่งมีแกนไฮดรอลิกกดอัด วัสดุจับยึดที่ใช้ ได้แก่ เบคเกอร์ไลต์ มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 150 °C ส เมื่อแกนไฮดรอลิกกดอัด ชิ้นทดสอบ พร้อมเม็ดเบคเกอร์ไลต์ เบ้าจะถูกให้ความร้อนจนถึงจุดหลอมละลายของเบคเกอร์ไลต์ ซึ่งใช้เวลา น้อยกว่าการหล่อด้วยเรซิน



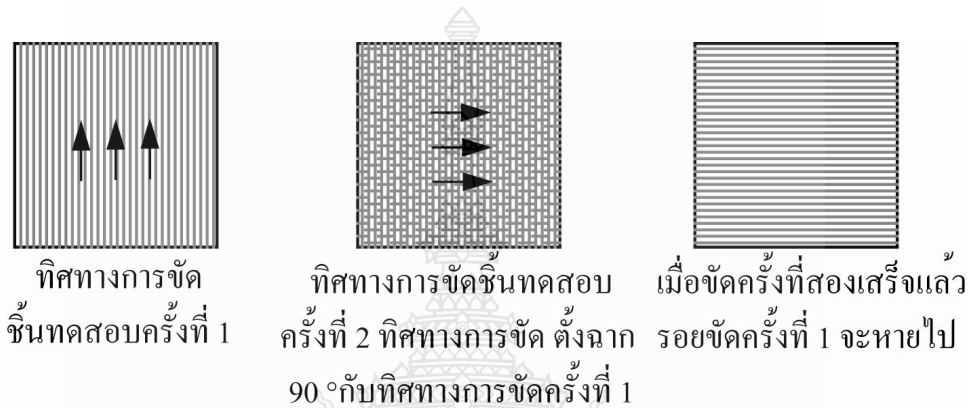
รูปที่ 2.8 การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค [16]

### 2.3.3.2 การขัดละเอียดชิ้นทดสอบ [16]

หลังจากการตัดชิ้นทดสอบอย่างถูกต้องและจับยึดชิ้นทดสอบอย่างเหมาะสมแล้วขั้นตอนต่อไปคือ การขัดละเอียดซึ่งการขัดจะขัดด้วยกระดาษทรายโดยเริ่มจากกระดาษทรายหยาบและเพิ่มความละเอียดขึ้นเรื่อยๆ ความหยาบละเอียดของกระดาษทรายกำหนดเป็นหมายเลข เช่น เบอร์ 150 280 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ ซึ่งเบอร์ 150 จะมีความหยาบ



กว่าหมายเลข 280 หรือ หมายเลข 400 จะมีความหยาบกว่าหมายเลข 1200 อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปลี่ยนหมายเลขกระดาษทรายจากหยาบเป็นละเอียดต้องหมุนขึ้นทดสอบที่ไป 90 องศา เพื่อให้รอยขีด ที่เกิดขึ้นใหม่ทับรอยขีดเก่า และจะทำให้สามารถรู้ได้ว่ารอยขีดเก่าถูกขัดออกหมดหรือยัง ขณะทำการขัดขึ้นทดสอบควรใช้น้ำช่วยเพื่อไม่ให้เกิดความร้อนและยังทำให้เม็ดทรายที่หลุด และเศษของขึ้นทดสอบสามารถไหล ออกไปได้ ซึ่งการขัดขึ้นทดสอบควรขัดกระดาษทราย ไปจนถึงอย่างน้อยหมายเลข 1000



รูปที่ 2.9 การขัดผิวขึ้นทดสอบ [16]

### 2.3.3.3 การขัดมันขึ้นทดสอบ°

หลังจากขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายจนถึงหมายเลข 1000 แล้วจะเห็นว่าผิวของ ขึ้นทดสอบมีลักษณะเป็นเส้นตามแนวของการขัด เมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์จะยังเห็นชัดเจนขึ้น ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์จึงยังไม่เพียงพอต้องทำให้ผิวของขึ้นทดสอบมีความเรียบมากกว่านี้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการขัดมัน โดยการขัดด้วยเครื่องขัดผ้าขัด และ ผงขัด ผงขัดที่นิยมใช้ ได้แก่ อลูมินา (อลูมิเนียมออกไซด์  $Al_2O_3$ ) ผสมน้ำ การขัดควรขัดเปียก นอกจากนั้นยังนิยมใช้ผงเพชรซึ่งมีขนาดระหว่าง 1 ถึง 7  $\mu m$  ผ้าขัดมันที่ใช้ยังสามารถแยกออกเป็นแบบขนยาว ซึ่งมีความนุ่มสูงทำให้สามารถขัดผิวได้ความเรียบสูง แต่ผลเสียคือทำให้บริเวณขอบกลายเป็นผิวโค้ง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้ผ้าขัดแบบขนสั้นที่มีความนุ่มน้อยกว่า ส่งผลให้ผิวที่ได้ อาจมีรอยขีดหลงเหลืออยู่บ้างการขัดมันเป็นขั้นตอนที่สำคัญก่อนการกัดกรดซึ่งใช้เวลาในการขัดพอสมควร

### 2.3.3.4 การกัดกรด

หลังจากการขัดมันแล้วผิวของ โลหะจะมีความเรียบ การทำให้สามารถมองเห็น เกรนของโลหะทำได้โดยการนำขึ้นทดสอบซึ่งผิวขัดมันกัดด้วยกรด(Etching) บริเวณขอบ



เกรนกรวด จะกัดจนขอบเกรนมีลักษณะโค้งมน เมื่อแสงจากกล้องจุลทรรศน์ส่องมากระทบจะสะท้อนไปทิศทางอื่น ทำให้มองเห็นบริเวณนี้เป็นสีดำ สามารถเห็นรูปร่าง ลักษณะและขนาดของเกรนได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้นเกรนแต่ละชนิดยังถูกกัดกัดไม่เท่ากัน ทำให้เห็นเกรนมีลักษณะที่แตกต่างกัน ออกไปได้ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดเหมาะกับชนิดของกรดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การกัดกรวดขึ้นทดสอบนานเกินไป (Over Etch) ทำให้ขอบเกรนถูกกัดมาก จนทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในขณะที่ ถ้าใช้เวลานานเกินไป ก็จะทำให้เห็นขอบเกรนไม่ชัดเจน เวลากัดกรวดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ ความเก่าใหม่ของกรดที่ใช้ และรวมถึงชนิดของโลหะที่กัดกรวด [23] ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้ ขึ้นทดสอบเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก รายละเอียดของน้ำยาคัดกรวดขึ้นทดสอบ สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคดัง ตารางที่/2.10

**ตารางที่ 2.10** รายละเอียดของน้ำยาคัดกรวดขึ้นทดสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [20]

น้ำยาคัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริก	กรดไนตริก (HNO <sub>3</sub> ) 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 90 มิลลิลิตร	ทองแดงและทองเหลือง	จุ่มหรือแช่คานาน 10 -30 s
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไฮโดรคลอริก (Ferric Chloride and Hydrochloric Acid)	เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> ) 2-5 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5-30 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	ทองแดงผสม	จุ่มหรือแช่ด้วยสำลี นาน 5-15 s
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก ½ ถึง 2 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือแช่คานาน 15-45 s
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	อลูมิเนียมผสม	แช่ด้วยสำลี นาน 10-15 s
กรดอะเซติก (Acetic Acid)	กรดอะเซติก 2-5 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	แมกนีเซียมผสม	จุ่มแช่

## 2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีความนิยมนมากในภาคอุตสาหกรรม [1] เพราะสามารถ เชื่อมต่อวัสดุได้อย่างรวดเร็ว มีความแข็งแรงเพียงพอกับการใช้งาน และมีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ยุ่งยาก การเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุดเป็นการเชื่อมแบบต่อเกลียวโดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานคือ อิเล็กโทรดตัวบนเคลื่อนที่ลงมากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกันและทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าตามค่าที่กำหนดแล้วก็ทำการกดอัดชิ้นงาน ด้วยความดันที่เหมาะสมกดค้างไว้ในเวลาที่เหมาะสมจากนั้นก็ทำการปลดชิ้นงาน การเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุดจะมี องค์ประกอบหลักร่วมกัน 3 อย่าง คือ ความร้อน ความดัน และเวลา [21] วิธีการเชื่อมต้านทานแบบจุดนั้น ไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมโลหะที่มีน้ำหนักเบา เพราะข้อเสีย เช่น ค่าใช้จ่ายการลงทุนในการดำเนินงานสูง เนื่องจากต้องการความร้อนสูง และการนำไฟฟ้าของโลหะ ทำให้สูญเสียพลังงานค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้เกิดความร้อนสูงนั่นเองจึงส่งผลไม่ดีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม [2] ต่อมาได้มีการคิดค้นวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวน โดย TWI (The Welding Institute) ของสถาบันวิจัยเทคโนโลยีของอังกฤษในปี ค.ศ.1991 [6] และได้ถูกพัฒนาเป็นวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด (Friction stir spot welding : FSSW) โดยกลุ่ม Sumitomo Light Metal Industries ,Ltd., Mazda, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., and Norsk Hydro ซึ่งวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด สามารถหลีกเลี่ยงการด้อยลงของสมบัติเชิงกลของโลหะเดิม อันเนื่องมาจากความร้อนทำให้เกิดการหลอมละลายและการแข็งตัวอีกครั้งของโลหะดังกล่าว จึงทำให้สามารถต่อชิ้นงานที่มีจุดหลอมละลายต่างกันหรือวัสดุต่างชนิดได้ [8] ซึ่งมีงานวิจัยที่มีการนำเอาวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมวัสดุต่าง ๆ มากมาย ได้แก่

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกลียวอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ของ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ได้ทำการวิจัยโดยใช้เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKH 57 เครื่องมือเชื่อมมีปลายเป็นตัวกวนรูปทรงกระบอก หมุนด้วยความเร็วรอบ 2000 - 3500 rpm ความเร็วในการกดตัวกวน 2-10 mm/min เวลาในการกดแฉตัวกวนที่บริเวณขอบเขต (Interface) ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม 0 -5 s ตัวกวนจะถูกดึงออกจากแนวเชื่อมจากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อเกลียวโดยการดึงเฉือน และ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งผลการทดลองพบว่า รอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเกิดขึ้นได้ดีด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด สามารถเชื่อมติดกันได้ และที่ความเร็วรอบ 3000 rpm ความเร็วในการกดตัวกวนลงไปแนวเชื่อม 8 mm/min และเวลาในการกดแฉ 3 s เป็นสภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด มีความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 95% ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสมเกรดAA1100 และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ

ความเร็วในการกดตัวกวนลงสู่รอยต่อ และเวลาในการกดแช่ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ แข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น [22]

รัช หนีเฟื่อง กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [23] ได้ทำการวิจัย เรื่อง อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อสมบัตินของรอยต่อเกะระหว่างอลูมิเนียม 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด ต่อสมบัตินของรอยต่อเกะของวัสดุดังกล่าว โดยใช้เครื่องมือที่ในการเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD 11 ที่มีปลายเป็นตัวกวนรูปทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 rpm ความเร็วในการกดตัวกวน 2-6 mm/min เวลากดแช่ 2-6 s ความลึกของตัวกวน 1.2 mm จากทำการเชื่อม และทำการทดสอบ 3 ลักษณะแบบแรงดึงเฉือน แบบประกบลอกผิว และแบบแรงดึงขวางพบว่าอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดซึ่งประกอบด้วย ความเร็วรอบ, ความเร็วในการกดตัวกวน และระยะเวลาการกดแช่ ตัวแปรทั้ง 3 ตัวมีความสัมพันธ์กันถ้าเปลี่ยนแปลงตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งจะทำให้ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเฉื่อยของรอยเชื่อม การเชื่อมแบบรอยต่อเกะ ด้วยความเร็วรอบ 3000 rpm อัตราป้อน 4 mm/min และเวลาการกดแช่ 6 s เป็นสภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงเฉื่อยของรอยต่อสูงสุด

อดิศร เปลี่ยนดิษฐ์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [24] ได้ทำการวิจัย เรื่องอิทธิพลของระยะลึกและรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อ การเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม เกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยใช้เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็ก JIS SKD 11 ทำการขึ้นรูปบ่ารูปทรงแบบต่างๆ ได้แก่ รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อมเป็นเกลียวกันหอย มีระยะพิต 0.29 mm รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อมมีลักษณะเอียงออกและเอียงเข้าด้วยมุม 4° รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อมโค้งเว้าเข้าและนูนออกด้วยรัศมี 2 mm และรูปทรงเครื่องมือเชื่อมแบนเรียบ ใช้ความเร็วรอบในการหมุนตัวกวน 3000 rpm ความเร็วในการกดตัวกวน 8 mm/min และความลึกจากผิวด้านบนของแผ่นอลูมิเนียม 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 mm ตามลำดับ พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 สามารถติดกันและมีความแข็งแรงสูงสุด 179 N/mm รูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด คือ รูปทรงบ่าเว้า รัศมี 2 mm และความแข็งแรงของรอยต่อเกะ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความลึกในการเชื่อมจากผิวอลูมิเนียมนั้นเพิ่มขึ้น

Z. Zhang, Xinqi Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, B. Zou [7] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดอลูมิเนียมผสม AA 5052 – H112 โดยใช้ เครื่องมือเชื่อม เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ปลายตัวกวนเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 และ 3 mm มีความยาว 1.8 mm บ่าเอียงเข้า 4° ใช้ความเร็วรอบในการหมุนตัวกวน 1541 และ 2256 rpm เวลากดแช่ตัวกวน 5 10 และ 15 s ตามลำดับ ความเร็วกดตัวกวน

1 mm/min ทำการทดสอบแบบแรงดึงเฉือน และแบบแรงดึงขวาง พบว่าที่ความเร็ว 1541 rpm ของการทดสอบ แรงดึงทั้งสองแบบให้ค่าแรงดึงสูงสุด 2847.7 N และ 902.1 N ตรงกับเวลาทดแฉ่ 5 s และ 15 s จากการทดสอบทั้งสองวิธีนั้นทำให้เกิดการแตกหักที่แตกต่างกัน การแตกหักแบบเฉือน เกิดภายใต้ แรงดึงแบบเฉือน และแรงดึงของการดึงแบบขวาง มีผลต่อความแตกหักเช่นกัน และสำคัญก็คือสมรรถนะในการเชื่อมนั้นก็ยังมีผลต่อประเภทของการแตกหักของรอยเชื่อมด้วย

Yasunari Tozaki, Yoshihiko Uematsu, Keiro Tokaji [8] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของรูปทรงเรขาคณิตเครื่องมือต่อ โครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดของอลูมิเนียมผสมเกรด AA 6061 หนา 2 mm โดยใช้เครื่องมือเชื่อมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ปลายตัวกวนเป็นเกลียวซ้าย M 3.5 มีความยาวต่างกัน คือ 3.7 3.1 และ 2.4 mm ความเร็วกดตัวกวน 20 mm/min กดลึกจากผิวแผ่นบน 0.2 mm ใช้ความเร็วรอบในการหมุนตัวกวน 2000 2500 3000 rpm และใช้เวลาในการกดแฉ่ 0.2 1 และ 3 s ตามลำดับ ทำการเชื่อมสองลักษณะ คือ แบบเกย แบบขวาง เมื่อทำการทดสอบพบว่า ผลของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมขึ้นอยู่กับความยาวตัวกวน ความเร็วรอบในการหมุนตัวกวน เวลาในการกดแฉ่ ซึ่งความยาวตัวกวนส่งผลต่อแรงดึงแบบเฉือน แต่ไม่ส่งผลต่อการดึงแบบขวาง ทำให้แตกหักสองแบบ ที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการแตกหักแบบเฉือน มีการแตกหักที่ผสม เกิดภายใต้แรงดึงแบบเฉือน และการแตกหักก็ขึ้นอยู่กับอัตราการแรงดึงด้วย

Chi-Sung JEON Sung-Tae HONG Yong-Jai KWON Hoon-Hwe CHO Heung Nam HAN [9] ได้ทำการศึกษา สมบัติของวัสดุของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดรอยต่อของอลูมิเนียมผสมเกรดต่างกัน โดยใช้วัสดุเป็น อลูมิเนียมผสมเกรด 5052-H32 และ อลูมิเนียมผสมเกรด 6061-T6 หนา 3 mm เครื่องมือเชื่อมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm ตัวกวนเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm ความยาว 4.2 mm กดลึก 4.55 mm บ่าเครื่องมือเชื่อม เป็นประเภทบ่าเว้า ใช้ความเร็วในการหมุน ตัวกวน 750 rpm ผลการทดลองแสดงให้เห็นกระบวนการทดลองที่แตกต่าง การรวมกันของ วัสดุบริเวณและสมบัติของวัสดุ รวมทั้งการกระจายของความแข็งแรง ของรอยต่อ FSSW มีแนวโน้มที่สมบัติทางกลแตกต่างกันตามช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันของกระบวนการเชื่อม

Yuan-Ching Lin , Ju-Jen Liu , Ben-Yuan Lin , Chun-Ming Lin , Hsien-Lung Tsai [10] ได้ทำการศึกษา ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อความแข็งแรงของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดรอยต่อเกย โลหะแมกนีเซียมผสม AZ61 โดยเครื่องมือเชื่อมทำจาก JIS SKD 61 เส้นผ่าศูนย์กลาง 12 mm ปลายตัวกวนดาเยเกลียว M4 ยาว 4 mm กดลึก 4.2 mm อัตราการกดตัวกวน 1 mm เ็นไขการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ใช้ความเร็ว 2500 rpm จะใช้เวลาทดแฉ่ 0-8 s โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 s เพื่อประเมินผลกระทบของเวลาทดแฉ่ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของการเชื่อมแรงเสียดทานกวนแบบจุดนั้น เพิ่มขึ้นตามความกว้างของการรวมตัวของ

เนื้อโลหะเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องมือและกดแช่ การผสมผสานกันของความเร็วของเครื่องมือและเวลากดแช่สามารถเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อได้ ภายใต้ การทดสอบแรงดึงแบบแรงดึงเฉือน การแตกเริ่มที่ปลายของรอยแยกและผ่านพื้นที่ อินเตอร์เฟรช รอยเชื่อม บางผ่านไปยังรูที่เกิดจากปลายตัวกวน ยิ่งไปกว่านั้น พฤติกรรมการแตกหัก การทดสอบแรงดึงแบบแรงดึงเฉือนจะขึ้นอยู่กับความกว้างของการรวมตัวของเนื้อโลหะเชื่อม

K.N. Solanki J.B. Jordan W. Whittington H. Rao and C.R. Hubbard [11] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างและ ปริมาณของความเค้นตกค้าง ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดโลหะแมกนีเซียมผสมเกรด AZ31 ตรวจสอบเพื่ออธิบายกลไกความผิดปกติและค่าพารามิเตอร์ในการ ซึ่งผลการทดลองเผยให้เห็นการลดลงของแรงดึงและความแข็งแรงอัดวิกฤต เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของความเหนียวและขนาดของเกรน ขณะที่ความเร็วในการหมุนและความลึกบ่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเกาะตัวกันระหว่างเม็ดเกรนอย่างแข็งแรง เป็นความเค้นตกค้างเป็นผลมาจากพารามิเตอร์ในการเชื่อม

A.P. Gerlich และ T. Shibayanagi [12] ได้ศึกษาเรื่องการเลื่อนของเม็ดเกรนในระหว่างการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดของอลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ใช้ความเร็วในการหมุนตัวกวน 750 -1500 rpm เครื่องมือเชื่อมรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ขึ้นรูปเป็นบ่า ปลายตัวกวนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ยาว 2.2 mm จากบ่าเครื่องมือกดลึก 0.2 mm ใช้กล้อง Electron backscattered diffraction (EBSD) ในการกำหนดของเกรน ทำการวัดอุณหภูมิ(K) บริเวณการกวน (SZ) พบว่าที่การกวนเกิดเม็ดเกรนที่มีขอบเกรนเป็นอิสระมีขนาดน้อยกว่า 250 nm เป็นอิสระจากผลกระทบ dislocations เกรนที่มีขนาดเฉลี่ยมากกว่า 500 nm ซึ่งมีความหนาแน่นการเกิดการเคลื่อนที่ของเกรนสูงมาก ซึ่งการเคลื่อนที่ของเกรนจะถูกทำลายเพียงเล็กน้อยในระหว่างการเชื่อม และพบความหนาแน่นการเกิดการเคลื่อนที่ของเกรนน้อยในเกรนที่มีขนาดน้อยกว่า 250 nm

T. Rosendo, B. Parra, M. A. D. Tier, A. A. M. da Silva, J. F. dos Santos, T. R. Strohaecker, [13] ได้ศึกษาการก่อตัวของรูปทรงคล้ายตะขอและสมบัติเชิงกลโลหะแมกนีเซียมผสม AZ31 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด เครื่องมือเชื่อมรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางปลายตัวกวน 4 mm ยาว 1.8 mm ใช้ความเร็วในการหมุนตัวกวน 2250 rpm เวลากดแช่ 0-4 อัตรากดตัวกวน 2.5 mm/s และยกกลับตำแหน่งเดิมด้วยความเร็ว 35 mm/min โดยทำการเชื่อมพบว่ารูปทรงคล้ายตะขอ และขนาดเกรดมีขนาดต่างกันอย่างมาก การก่อตัวของรูปทรงคล้ายตะขอเกิดขึ้นบริเวณการกวน (SZ) ความกว้างมีขนาด 250 nm ที่เวลา 0 s เมื่อเคลื่อนเครื่องมือเชื่อมออกจาก AZ31 หลังจากใช้เวลากดแช่ 1-4 s เวลากดแช่ ได้ส่งผลกระทบต่อ บริเวณ

ผลกระทบทางความร้อนเชิงกล (TMAZ) และบริเวณกระทบทางความร้อน (HAZ) เวลาบัดกรี 1 min ให้ค่าแรงดึงสูงสุด และลดลงเมื่อเวลาบัดกรีเพิ่มขึ้น

Y. F. Sun , H. Fujii [25] ได้ประสบความสำเร็จในกระบวนการเชื่อม FSSW และรอยต่อของโลหะผสม Zr55 Cu30 Al10 Ni5 (BMG) แผ่นหนา 2 mm กับทองแดงบริสุทธิ์ พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบางส่วนมีลักษณะคล้ายพื้นเลื้อยเกิดขึ้นที่ขอบของแผ่น BMG และบางนิวเคลียส (Nucleuses) ขนาดนาโนที่กระจุกกระจายอยู่ในด้าน BMG ตามอินเตอร์เฟซร่วม Cu / BMG ที่ด้านบนของทองแดง (Cu) ใกล้กับรูแกนเชื่อม (Key Hole) ชิ้นส่วน BMG ถูกฝังอยู่ในเนื้อแท้ของทองแดง ผลที่ตามมาอย่างมีนัยสำคัญของการทดสอบแรงดึงเฉือนแสดงให้เห็นว่ารอยต่อของทองแดง (Cu) กับ BMG รอยต่อพังทลายที่แรงดึงสูงสุด 2300 N ผ่านพื้นที่บริเวณกวนพังทลายแบบดิ่งนิกขาดออกมา

T. Saeida, A. Abdollah-zadehb, B. Sazgarib [26] ได้ทำการศึกษารอยต่อของโลหะผสมอลูมิเนียม 1060 และทองแดงบริสุทธิ์โดยการเชื่อมเสียดทานกวนและผลของความเร็วในการเชื่อมบริเวณผิวสัมผัส (interface) ศึกษาทางสัณฐานวิทยา, และความแข็งแรงที่ถูกรวบรวม ผลการทดลองพบว่าในอลูมิเนียมใกล้กับบริเวณผิวสัมผัส (interface) จะเกิดโลหะประกอบ Al /Cu มีพื้นที่มีดที่ถูกสร้างขึ้นในบริเวณนี้สารประกอบโลหะ (intermetallic) ของ Al<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub> และ Al<sub>2</sub>Cu และบางส่วนตรวจพบการแตกร้าว (Microcracks) จำนวนของการแตกร้าว (Microcracks) ดังกล่าวลดลงด้วยความเร็วการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าความเร็วสูงขึ้นในการเชื่อมจาก 118 และ 190 mm/min, ข้อบกพร่องที่เป็นโพรงกำลังก่อตัวขึ้นภายในรอยต่อเป็นผลมาจากความร้อนไม่เพียงพอ ผลของการทดสอบแรงดึงเฉือนเผยให้เห็นว่าแรงดึงเฉือนสูงสุดของรอยต่อได้ที่ความเร็วการเชื่อมจาก 95 mm/min ที่ความเร็วการเชื่อมนี้ ไม่มีข้อบกพร่องในโพรงและรอยแตกร้าว (Microcracks) น้อยที่พบในการเชื่อม

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การดำเนินงานเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจรวดรอยต่อเกลยอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 การดำเนินการเตรียมวัสดุในการเชื่อม ขั้นตอนการเชื่อม ขั้นตอนการทดสอบซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อม ในการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงแบบกากบาทโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3137 วัสดุสำหรับการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจรวดรอยต่อเกลยอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 มีลักษณะดังนี้

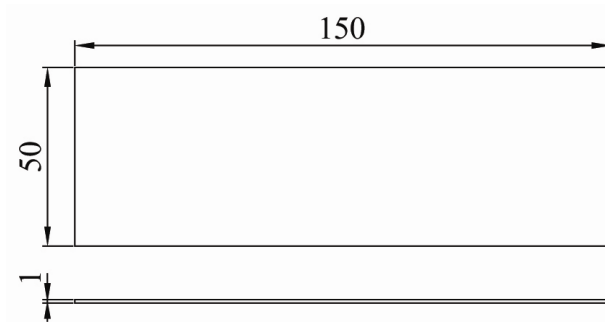
3.1.1 ชิ้นงานอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 มีส่วนผสม ทางเคมี ดังตารางที่ 3.1 มีสมบัติทางกล ดังตารางที่ 3.2 และมีความยาว 150 mm ความกว้าง 50 mm ความหนา 1 mm ดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง

AA 1100												
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn	Pb	Cr	
99.21	0.122	0.53	0.103	0.013	<0.1	0.001	<0.017	0.01	0.005	0.006	<0.001	
AA 5052												
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn	Pb	Cr	
96.32	0.147	0.36	<0.02	0.036	2.897	0.003	<0.017	<0.01	0.012	0.032	0.1	72

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของวัสดุทดลอง

	แรงดึงสูงสุด (N)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ค่าความแข็ง (HV)
AA 1100	2250	90	35	50
AA 5052	6300	250	4.37	75



หน่วย : mm

รูปที่ 3.1 ขนาดของวัสดุทดลองอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และ อลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052

### 3.2 ขั้นตอนการเชื่อม

ในการทดลองเชื่อมครั้งนี้ ใช้เครื่องกักควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์แนวตั้งโดยการเขียนชุดคำสั่ง เพื่อสั่งให้เครื่องเชื่อมทำงาน ซึ่งจะทำการเชื่อมชิ้นงานแบบกากบาท โดยการทดลองมีขั้นตอนในการปรับตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ดังนี้

#### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมทดสอบ

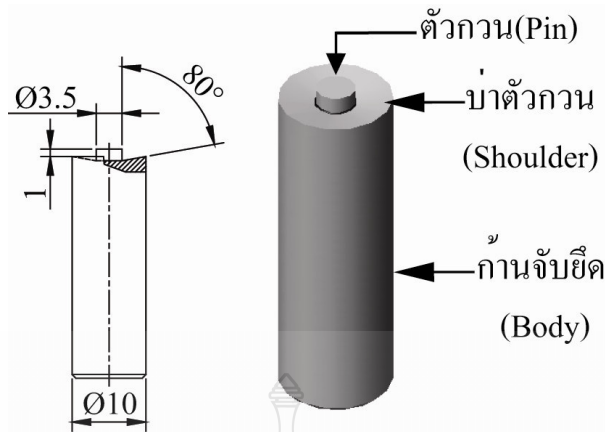
การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด อุปกรณ์ที่สำคัญในการเชื่อมมีดังต่อไปนี้

##### 3.2.1.1 ตัวกวน

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด สิ่งสำคัญ คือ ตัวกวน ซึ่งมีหน้าที่ในการกวน ให้น้ำเนื้อวัสดุเกิดความร้อนและประสานติดกัน ดังนั้นตัวกวนจะต้องเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อแรงกด แรงเสียดทาน แรงสั่นสะเทือนและอุณหภูมิที่สูงได้ และที่สำคัญต้องมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่นำมาทดสอบด้วย ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้เครื่องมือในการเชื่อม ทำจากเหล็กเครื่องมือ เกรด JIS SKD 11 มาทำเป็นตัวกวน โดยการกลึงขึ้นรูป ซึ่งมีหน้าที่ทำหน้าที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

- 1) ก้านจับยึด (Body) คือส่วนที่ทำหน้าที่ เป็นพื้นที่ในการจับยึดของหัวจับของเครื่องกักควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm
- 2) บ่าตัวกวน (Shoulder) บ่าตัวกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm และมุมเอียงเข้าหาศูนย์กลาง ทำมุม 80 °
- 3) ตัวกวน (Pin) คือ หัวสลักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 mm





หน่วย : mm

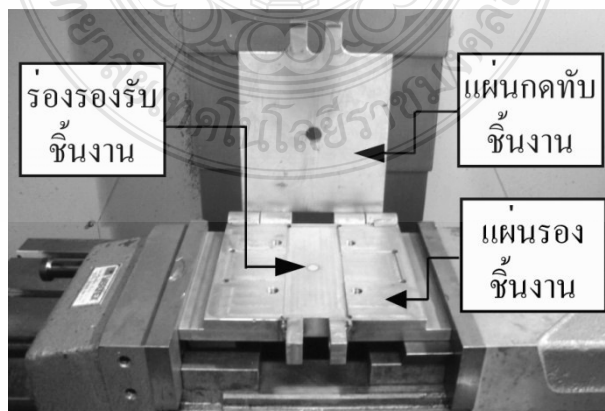
รูปที่ 3.2 ขนาดและรูปร่างตัวกวน

### 3.2.1.2 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดครั้งนี้ ถูกออกแบบ มาตรฐาน JIS Z 3137 มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

1) แผ่นรองชิ้นงาน มีขนาดความกว้าง 160 mm ความยาว 210 mm และความหนา 20 mm กัดเป็นร่อง ด้านข้างทำเป็นบานพับเพื่อต่อการ เปิด-ปิด อีกด้านมีพื้นที่สำหรับจับยึดแผ่นกดทับชิ้นงานดัง รูปที่ 3.3

2) แผ่นกดทับชิ้นงาน ออกแบบให้ตรงกลางของแผ่นกดทับตัดเป็นช่องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm เพื่อเป็นช่องในการเชื่อมให้ด้านเป็นบานพับเพื่อต่อการ เปิด-ปิด อีกด้านมีพื้นที่สำหรับจับยึดแผ่นรองชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.3 การจับยึดแผ่นรองและแผ่นกดทับนั้นใช้คีมล็อกบีบ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการหยิบชิ้นงาน เข้า-ออก



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแบบกากบาท

### 3.2.2 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม

3.2.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง ชิ้นงานเชื่อมทำจาก อลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100/และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 ความหนา 1 mm ทำการตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 50 mm ความยาว 150 mm โดยให้แนวการตัดด้านความขนานแนวรีด ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้ใช้ เครื่องตัดโลหะแผ่นแบบกึ่งอัตโนมัติยี่ห้อ GASPARINI รุ่น C0 3004 ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องตัดโลหะแผ่นแบบกึ่งอัตโนมัติยี่ห้อ GASPARINI รุ่น C0 3004

3.2.2.2 การลบครีบบนชิ้นงาน ครีบบนชิ้นงานเกิดจากการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น เกิดขึ้นบริเวณขอบชิ้นงานอาจส่งผลต่อการทดสอบทำให้ผลคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งการลบครีบบนชิ้นงานทำโดยใช้ตะไบละเอียดขัดบริเวณขอบชิ้นงานและขัดปรับแต่งผิวด้วยกระดาษทราย ทั้งสี่ด้าน

3.2.2.3 การทำความสะอาดชิ้นงาน หลังจากทำการตัดแผ่นอลูมิเนียม แกะฟิล์มพลาสติกบนผิวหน้าอะลูมิเนียมที่มีไว้เพื่อป้องกันการเกิด อ็อกไซด์ออกก่อนทำการเชื่อมต้องทำการขัดผิวชิ้นงานทดสอบบริเวณจุดสัมผัสกับบ่าตัวกวนด้วยกระดาษทราย เบอร์ 350 ด้านชิ้นงานทดสอบด้วย อะซิโตน เพื่อขจัดสิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงาน

### 3.2.3 กำหนดเงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขในการทดลองนี้จะกำหนดจากตัวแปรที่สำคัญในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดอันได้แก่ ความยาวของแกนหมุน ความเร็วรอบในการหมุน เวลาในการกดแช่แกนหมุน โดยจะเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

3.2.3.1 ความยาวหัวสลักแกนหมุน (Pin) 3 แบบ คือ หัวสลักแกนหมุนยาว 1, 1.4 และ 1.7 mm

3.2.3.2 ความเร็วรอบ 2,500, 3,000 และ 3,500 rpm (Rotational Speed)

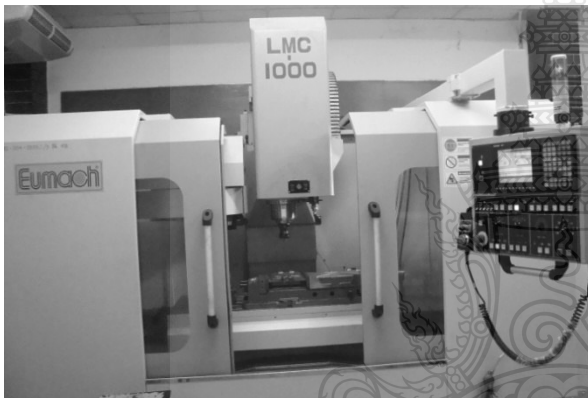
3.2.3.3 เวลาในการกดแช่ 2, 3 และ 4 s (Holding time)

3.2.3.4 ความเร็วในการกด 8 mm/min (Feed rate)

3.2.3.5 กดลึกจากป่าตัวกวน 0.2 mm

### 3.2.4 ขั้นตอนการเชื่อม

3.2.4.1 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดจำเป็นต้องมีการควบคุมเงื่อนไขการทดสอบต่างๆ เช่น ความเร็วในการกด ความเร็วรอบในการหมุนกวน เวลาในการกดแช่ เป็นต้น ซึ่งในการเชื่อมทดสอบครั้งนี้ จึงใช้เครื่องจักรควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นเครื่องกัดแนวตั้งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EUMACH รุ่น LMT 1000 สามารถปรับความเร็วรอบ ความเร็วกด และเวลาในการกดแช่ ตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ ดังรูปที่ 3.5 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้



(ก) เครื่องกัดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ

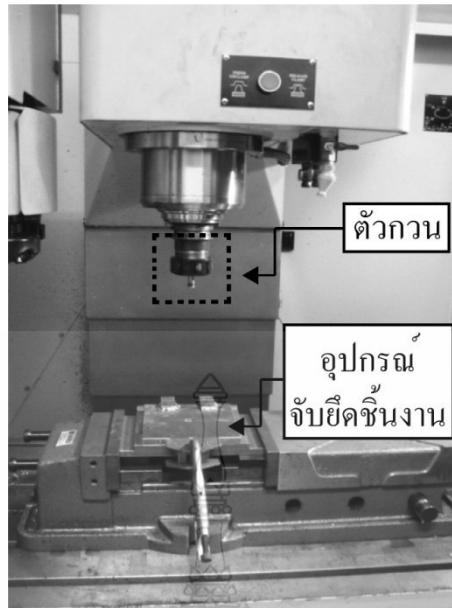
(ข) แผงควบคุมเครื่องกัดควบคุมด้วย

EUMACH รุ่น LMT 1000

คอมพิวเตอร์

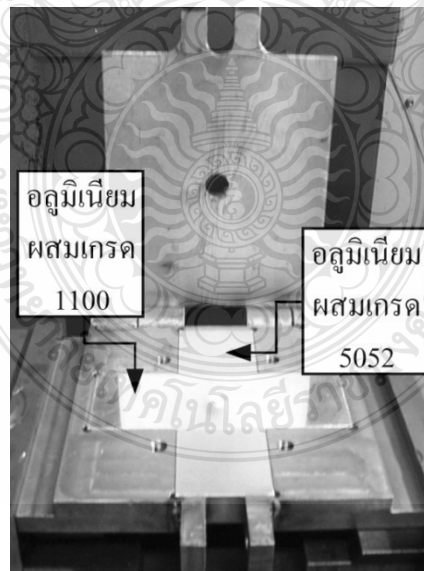
### รูปที่ 3.5 เครื่องเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด

3.2.4.2 การประกอบตัวกวน โดยประกอบเข้าคอลเล็ต เลือกขนาดของรูสวมให้เหมาะสมกับขนาดของตัวกวน ประกอบตัวกวนเข้ากับหัวเครื่องกัดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ปรับตั้งตำแหน่งศูนย์กลาง ตัวกวนให้ตรงจุดศูนย์กลางการเชื่อม เลื่อนผิวสัมผัสด้านหน้าของหัวสลัก (Pin) สัมผัสกับผิวของชิ้นงานเชื่อม ปรับเป็นตำแหน่ง ZERO ของเครื่องจักร จากนั้นเลื่อนหัวสลักขึ้นประมาณ 100-200 mm ปรับเป็นตำแหน่งเริ่มต้นตัวกวน



รูปที่ 3.6 การประกอบตัวกวนและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

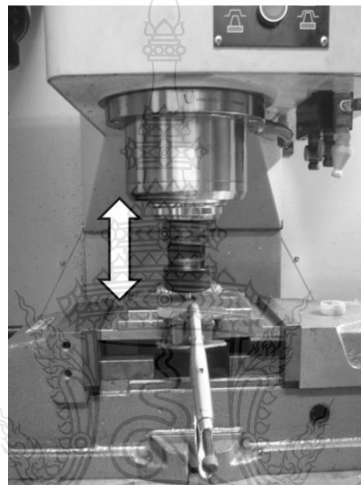
3.2.4.3 การจัดวางชิ้นงานการเชื่อม ในการทดลองครั้งนี้การวางชิ้นงานเชื่อมลงในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานนั้น ทำโดยการวางแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 ลงในร่องล่างของแผ่นรองชิ้นงาน แล้ววางทับด้วยแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 มีระยะการซ้อนเกย 50 mm ตามมาตรฐาน JIS Z 3137 ดังรูปที่/3.7 ปิดทับด้วยแผ่นกดทับชิ้นงาน และทำการคล้องอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานให้มั่นคง



รูปที่ 3.7 การจัดวางชิ้นงานเชื่อม

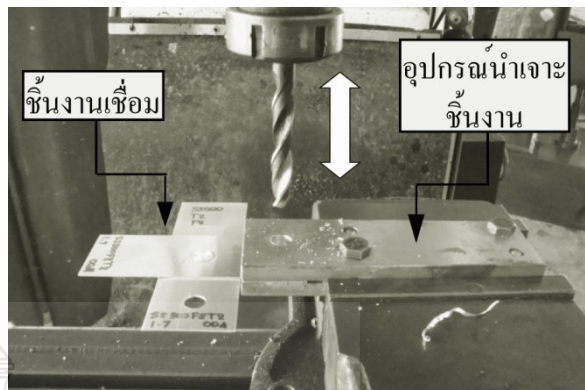
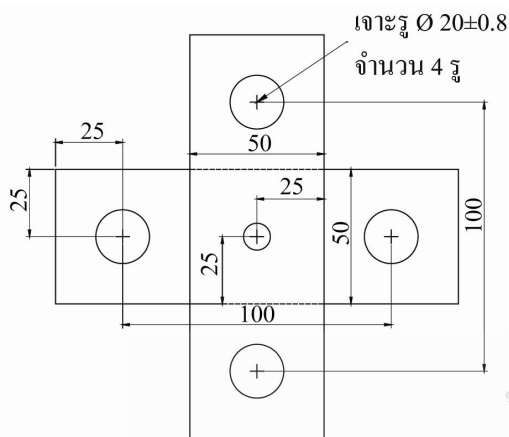
3.2.4.4 การตั้งค่าโปรแกรมคำสั่งเงื่อนไขการทดลอง โดยการป้อนคำสั่งลงบนแผงควบคุมเครื่องกัดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ตามค่าความลึกในการเชื่อม ความเร็วรอบตัวกวน เวลาทดแซ่ และอัตราป้อน ของการทดลอง แล้วจึงทำการเชื่อม

3.2.4.5 การทำการเชื่อม เมื่อกดปุ่มเริ่มการเชื่อม เครื่องกัดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เริ่มทำงาน ตัวกวนหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด และเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับผิววัสดุเชื่อม จากนั้นตัวกวนเคลื่อนที่หมุนกวนลงด้วย อัตราป้อน 8 mm/min จนถึงตำแหน่งที่กำหนด ทดแซ่ไว้ตามค่าที่กำหนด จากนั้นตัวกวนจะเคลื่อนที่ขึ้นไปอยู่ในตำแหน่งเดิม ดังรูปที่ 3.8



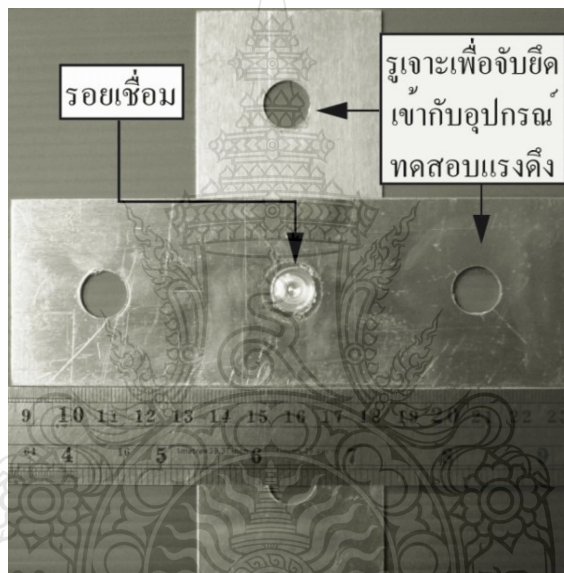
รูปที่ 3.8 การทำการเชื่อมทดลอง

3.2.4.6 นำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และตรวจสอบความเรียบร้อย หลังจากที่ได้ทำการเชื่อมชิ้นงานที่จะทำการทดสอบเรียบร้อยแล้วให้นำชิ้นงานทั้งหมดไปทำการเจาะรูขนาด  $20 \pm 0.8$  mm ตามมาตรฐาน JIS Z 3137 เพื่อจับเข้าอุปกรณ์จับยึด ดังรูปที่ 3.9 (ก) และหลังจากที่ได้ทำการเจาะรู ดังรูปที่ 3.9 (ข) เพื่อจับยึดเข้ากับอุปกรณ์จับยึดในการทดสอบแรงดึงแบบกากบาทด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 3.9 (ค)



(ก) ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาท

(ข) การเจาะรูชิ้นงานเพื่อจับยึดเข้าอุปกรณ์จับยึดเพื่อทดสอบแรงดึงแบบกากบาท



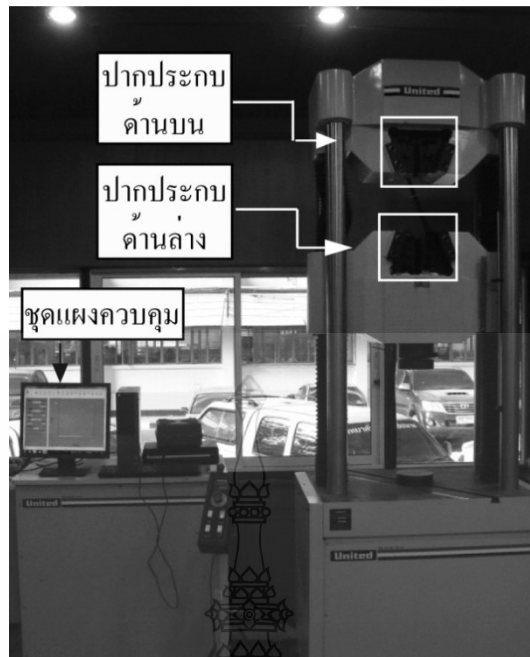
(ค) ชิ้นงานเชื่อมทดสอบแรงดึงแบบกากบาท

### รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาท

## 3.3 การทดสอบรอยเชื่อม

### 3.3.1 ทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึง

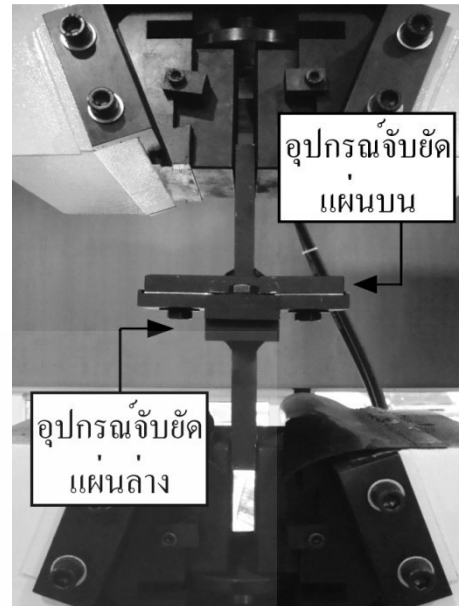
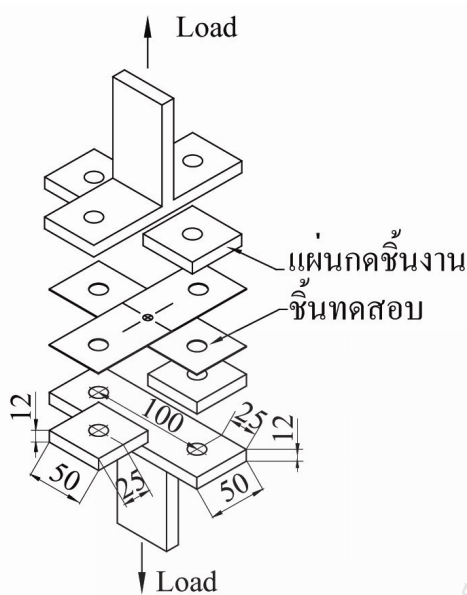
การทดสอบแรงดึง ใช้เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ ยี่ห้อ United รุ่น SHFM – 1000 KN ทดสอบแรงดึงสูงสุด 100 ton ความกว้างฝาประกบ 150 mm สามารถทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง แบบอเนกประสงค์ ยี่ห้อ United รุ่น SHFM – 1000 KN

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมในการทดสอบแรงดึงแบบกากบาท ถูกออกแบบให้สอดคล้องกับ มาตรฐาน JIS Z 3137 โดยออกแบบเป็นรูปกากบาท มีส่วนประกอบ 2 ส่วน ส่วนอุปกรณ์จับยึดแผ่นบน ถูกออกแบบเป็นรูปตัวทีที่กว้าง 50 mm ความยาว 150 mm เจาะรู 2 รู ระยะห่างของรูเจาะ 100 mm หนา 20 mm ตีปเกลียว M 20 ค้ำจับยึดด้านบนความยาว 150 mm ฝาประกบจับยึดออกแบบเป็นรูปสี่เหลี่ยมความกว้าง 50 mm อุปกรณ์จับยึดแผ่นล่าง ออกแบบเหมือนแผ่นจับยึดด้านบน โดยออกแบบเป็นรูปตัวทีที่กว้าง 50 mm ความยาว 150 mm เจาะรู 2 รู ระยะห่างของรูเจาะ 100 mm ตีปเกลียว M 20 ค้ำจับยึดแผ่นล่างความยาว 150 mm ดังรูปที่ 3.11 (ก)





(ก) รูปทรงอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานและการประกอบ  
ชิ้นงานเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

(ข) การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเข้ากับ  
เครื่องทดสอบแรงดึง

รูปที่ 3.11 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาท

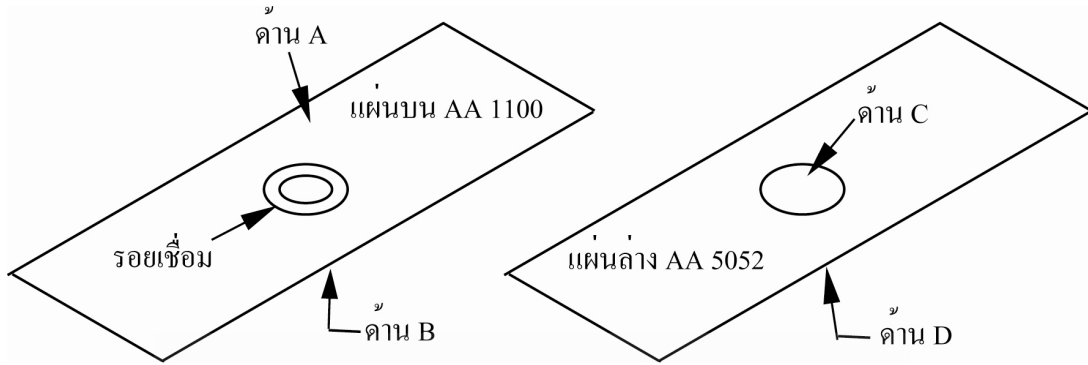
3.3.1.1 การทดสอบแรงดึงประกอบชิ้นงานเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์จับยึดในการทดสอบแรงดึงแบบกากบาท ดังรูปที่ 3.11 (ก)

3.3.1.2 การจับยึดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบแรงดึงเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยการปรับระยะปากกาจับชิ้นทดสอบให้มีระยะที่เหมาะสมกับระยะของอุปกรณ์จับยึด จับยึดชิ้นงานทดสอบเข้ากับปากกาจับชิ้นทดสอบด้านล่างก่อน ดังรูปที่ 3.11 (ข) เพื่อลดผลกระทบจากน้ำหนักอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบต่อรอยเชื่อม จากนั้นจับยึดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบเข้ากับปากกาจับชิ้นทดสอบด้านบน

3.3.1.3 ตั้งค่าเงื่อนไขในการทดสอบแรงดึงโดยกำหนดค่าในการทดสอบดังนี้ ระยะระหว่างปากกาจับชิ้นทดสอบมีความกว้าง 230 mm แรงในการดึง 0.509 MPa/s ความเร็วในการดึง 10 mm/min จากนั้นทำการดึงทดสอบให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน

3.3.1.4 เมื่อทำการทดสอบแรงดึงแล้ว ทำการตรวจสอบผิวหน้าการพังทลายของรอยเชื่อมโดยกำหนดด้านของรอยเชื่อมที่ผ่านการทดสอบคือ แผ่นบนด้านบนใช้สัญลักษณ์ A แผ่นบนด้านล่างใช้แผ่นบนด้านบนใช้สัญลักษณ์ B แผ่นล่างด้านบนใช้แผ่นบนด้านบนใช้สัญลักษณ์ C แผ่นล่างด้านล่างใช้แผ่นบนด้านบนใช้สัญลักษณ์ D ดังรูปที่ 3.12





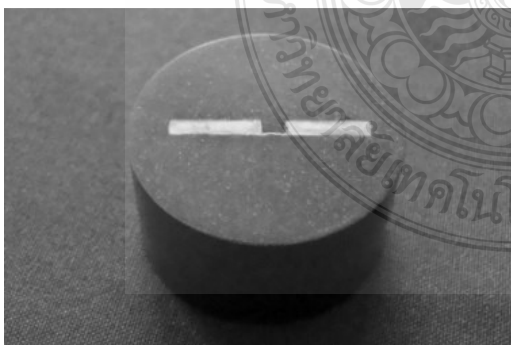
รูปที่ 3.12 ด้านการตรวจสอบผิวหน้าการพองทลายรอยเชื่อมทดสอบแรงดึง

### 3.3.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมครั้งนี้ใช้เครื่องทดสอบที่สามารถให้แรงที่กำหนดได้ หรือให้แรงภายในช่วงแรงทดสอบที่ต้องการได้ และสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM E 92 ซึ่งครั้งนี้ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ HUAYIN รุ่น HVS – 1000A ดังรูปที่ 3.14 (ก) ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.2.1 การตัดเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ ให้เหลือขนาดความยาว ประมาณ 20 mm ผ่านกึ่งกลางรอยเชื่อม จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบ

3.3.2.2 การหล่อเรซินและ หลังจากนั้นทำการตัดชิ้นงานให้ได้บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการหล่อเรซินหรือเมสส์ตั้งชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานหลังจากการหล่อ เรซินหรือเมสส์ตั้ง ดังรูปที่ 3.13 (ก) และดังรูปที่ 3.13 (ข)



(ก) ชิ้นงานหลังจากการเมสส์ตั้ง

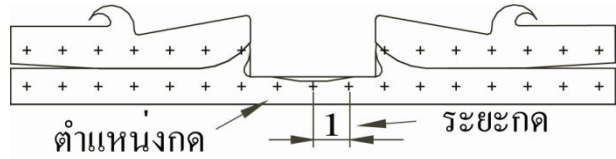


(ข) ชิ้นงานหลังจากการหล่อเรซิน

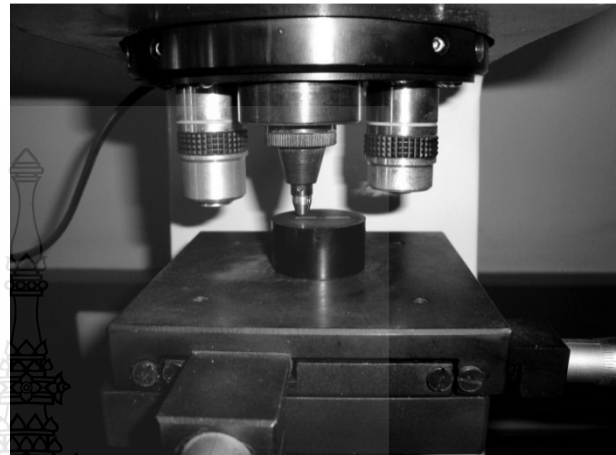
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานหลังจากการหล่อเรซินหรือเมสส์ตั้ง



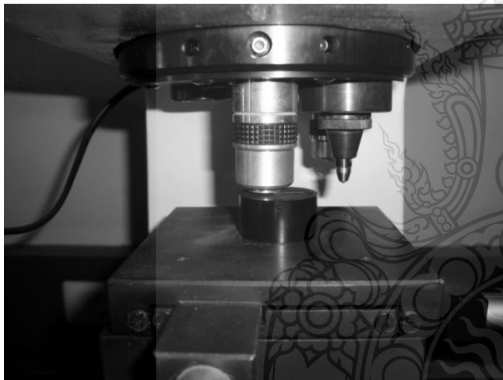
(ก) เครื่องทดสอบความแข็ง



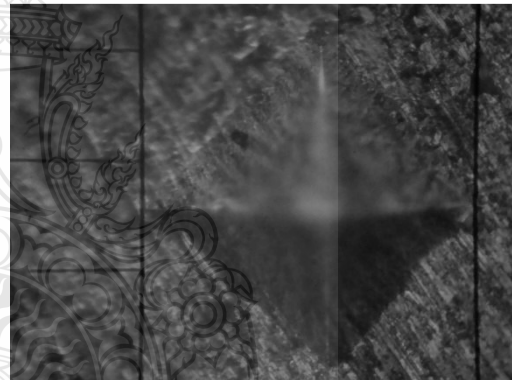
(ข) ตำแหน่งทดสอบความแข็ง



(ค) การกดความแข็งรอยเชื่อม



(ง) การวัดรอยกดความแข็ง



(จ) รอยกดความแข็งแบบวิกเกอร์บนรอยเชื่อม

รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง

3.3.2.3 เมื่อทำการหล่อชิ้นงานด้วยเรซินหรือเม้าส์ตั้งชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานทดสอบมาทำการขัดบนเครื่องขัดโครงสร้างจุลภาค และมีน้ำไหล ด้วยกระดาษทราย เบอร์ 240 320 420 540 600 800 และเบอร์ 1000 ตามลำดับ

3.3.2.4 นำชิ้นงานมาทำการทดสอบความแข็ง บริเวณตำแหน่งที่กำหนด ดังรูปที่ 3.13 (ข) โดยใช้แรงในการกด 9.81 kgf กดแช่ 10 s จากนั้นทำการวัดความกว้างของรอยกด และคำนวณค่าความแข็งรอยเชื่อม ซึ่งหน่วยเป็น HV ดังรูปที่ 3.14 (ง) และรูปที่ 3.14 (จ)

### 3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure test) และ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure test)

หลังจากนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อม มาทำการวัดขนาดความกว้างของบริเวณที่ทำการเชื่อม และทำการตรวจสอบลักษณะรอยฉีกขาด ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วทำการวัดขนาดความโตของรอยเชื่อมบริเวณที่เกิดการฉีกขาด เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความแข็งแรงดึงเฉือน กับขนาดความโตของรอยเชื่อมแล้ว จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเตอร์เฟส โดยทำการศึกษารวมตัวของชิ้นทดสอบ และทำการวัดขนาดช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างการรวมตัวของชิ้นทดสอบ ซึ่งจำเป็นจะต้องมีขั้นตอนการเตรียมงานในการทดสอบ ดังนี้

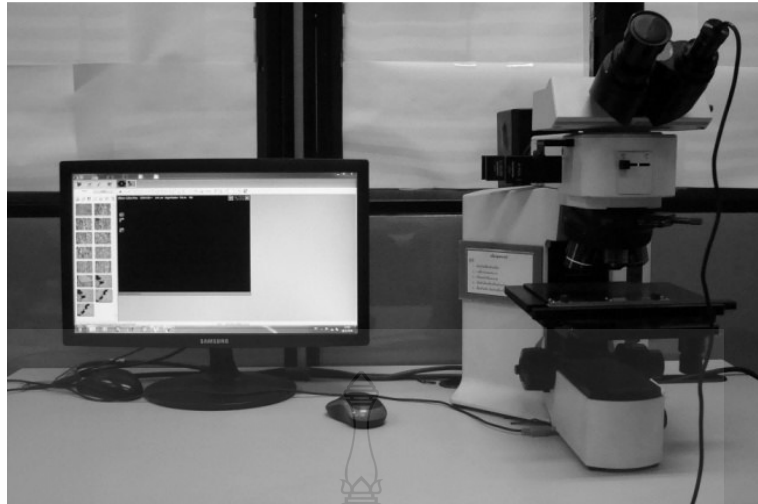
3.3.3.1 การขัดชิ้นงานทดสอบ โดยการนำชิ้นงานที่ทำการหล่อเรซิน มาทำการขัดบนเครื่องขัดโครงสร้างจุลภาค และมีน้ำไหลด้วยกระดาดทราย เบอร์ 240 320 420 540 600 800 1,000 และเบอร์ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขัดด้วยผ้าสักหลาดหล่อลื่นด้วย ฟองอะลูมิเนียมอีกครั้งในขั้นสุดท้ายเพื่อให้ชิ้นงานมีความเรียบ และเกิดความมันวาวยิ่งขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การขัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน

3.3.3.2 การกัดกรดเพื่อส่องดูโครงสร้างชิ้นทดสอบโดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริก 2 mm ผสมกับน้ำกลั่น 200 ml โดยการตวงกรดลงในบีกเกอร์ จุ่มแช่นาน 15 s ล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วจึงทำการเป่าให้แห้ง

3.3.3.3 การส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูโครงสร้าง นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดแล้ว มาทำการส่องโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ OLYMPUS BX51M ส่องโครงสร้างจุลภาค และทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กล้องส่องโครงสร้างจุลภาค ยี่ห้อ OLYMPUS BX51M

เพื่อให้ปฏิบัติงานในงานวิจัยนี้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด ดังนั้นในทุกๆ ขั้นตอนการทำงานผู้วิจัยจะต้องปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการที่ได้ออกแบบ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลคำตอบ อันอาจจะเกิดขึ้นจากปัจจัยแทรกซ้อน ซึ่งทำให้งานวิจัยขาดความน่าเชื่อถือ



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของรอยต่อเกยระหว่าง อะลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และ อะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบ เวลาในการกดแช่ และความยาวของหัวตัวกวน ที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปวัดขนาด โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค ซึ่งในส่วนของบทนี้เป็นการนำเสนอผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบ ดังนี้

#### 4.1 ผลทดสอบเบื้องต้น

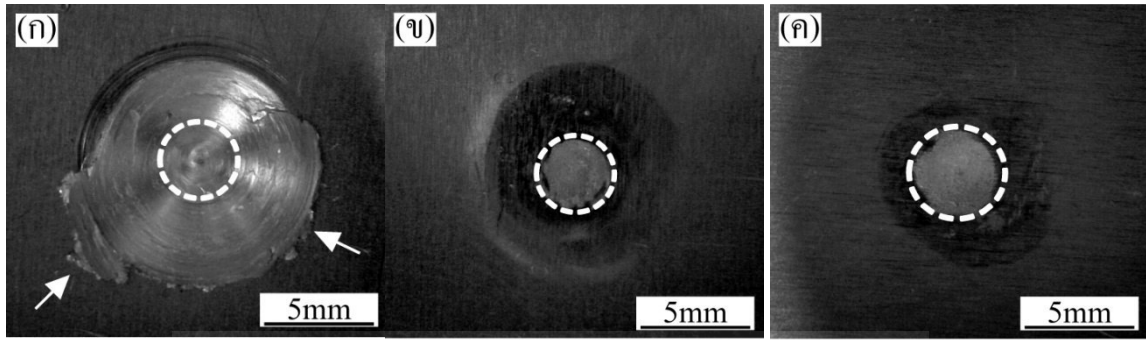
การศึกษาการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าจากรายงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น อติสร เปลียนคิษฐ์ [22] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะลึกและรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อ การเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 พบว่ารูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมรูปทรงบ่าเว้า ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด และความแข็งแรงของรอยต่อเกยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความลึกในการเชื่อมจากผิวอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ซึ่ง ธวัช หมีเฟื่อง [21] รายงานไว้ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ว่าความเร็วรอบตัวกวนที่ต่ำจะทำให้ความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อมีค่าต่ำ แต่ถ้าเพิ่มความเร็วรอบในการเชื่อมมากขึ้นไปก็จะทำให้ค่าความแข็งแรงเหนือนมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน และพบว่าความลึกของตัวกวนตรงบริเวณอินเตอร์เฟซของรอยต่อจะให้ความแข็งแรงเหนือนสูงสุด ซึ่งในการวิจัยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกยอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ของกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [20] ได้รายงานไว้ว่า ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm ความเร็วในการกดตัวกวนลงไปบนแนวเชื่อม 8 mm/min และเวลาในการกดแช่ 3 s เป็นสภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด เมื่อเพิ่มความเร็วรอบ ความเร็วในการกดตัวกวนลงสู่รอยต่อ และเวลาในการกดแช่ที่อินเตอร์เฟซของรอยต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกยเพิ่มขึ้น และ Yasunari et al [8] ได้ทำการศึกษา ผลกระทบของรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือเชื่อมต่อ โครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 6061 พบว่าผลของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมขึ้นอยู่กับความยาวตัวกวน ความเร็วรอบในการหมุนตัวกวน เวลา

ในการกดแซ่ เป็นต้น ซึ่งจากการ ศึกษาค้นคว้า จากรายงานวิจัยดังกล่าว พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแรงรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด คือ รูปทรงของตัวกวน ระยะในการสอดตัวกวน เวลากดแซ่ ความเร็วรอบในการหมุนตัวกวน ที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงกำหนดให้เครื่องมือเชื่อม มีรูปทรงกระบอก ปลายตัวกวนมีความยาว 1 mm และระยะในการสอดตัวกวน เท่ากับ 1.2 mm เพื่อ กำหนดตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ของรอยต่อที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึง ได้กำหนดตัวแปรการทดลองในเบื้องต้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการกำหนดตัวแปรในการทดลอง โดยกำหนดความเร็วรอบของตัวกวน ที่ 2,000 rpm 2,500 rpm 3,000 rpm 3,500 rpm 4,000 rpm ระยะเวลากดแซ่ที่ 3 s อัตราการกดตัวกวน 8 mm/min ตัวแปรละ 2 ชั้นทดสอบ หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทำการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ซึ่งการทดลองเบื้องต้นครั้งนี้ ยังไม่ได้กำหนดตัวแปรที่สมบูรณ์ในการเชื่อม ซึ่งคาดว่าอาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงแบบกากบาทนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในการทดลองเบื้องต้นที่ความเร็วรอบของตัวกวน 2,000 rpm ระยะเวลากดแซ่ที่ 3 s อัตราการกดตัวกวน 8 mm/min ซึ่งหลังจากทำการเชื่อมเสร็จเมื่อยกตัวกวนขึ้นจากชิ้นงานเชื่อม พบว่ามีลูมิเนียมติดที่บริเวณบ่าตัวกวน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะปลายเครื่องมือเชื่อมที่มีลูมิเนียมติดที่บริเวณบ่าตัวกวน

เมื่อยกชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึด และออกแรงขยับชิ้นงานเชื่อมทั้งสองเพียงเล็กน้อย พบว่าชิ้นงานเชื่อมทั้งสองหลุดออกจากกัน ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานเชื่อมทั้งสองไม่สามารถติดกัน ดังรูปที่/4.2



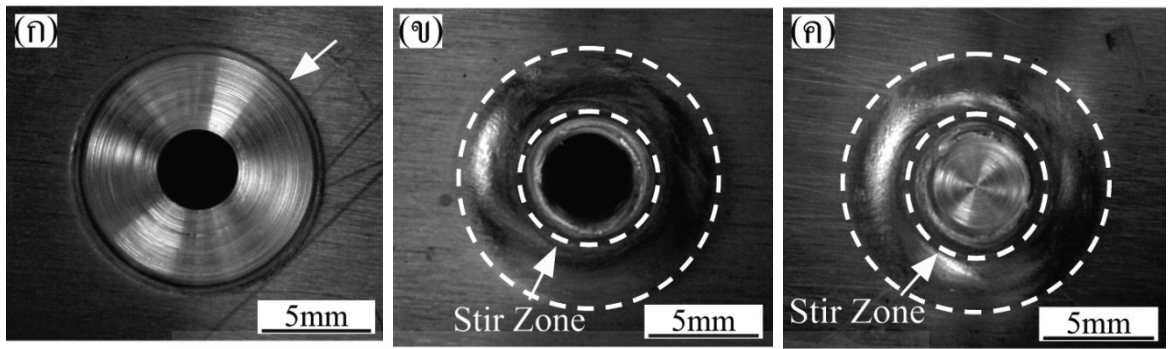
(ก) ด้าน A

(ข) ด้าน B

(ค) ด้าน C

รูปที่ 4.2 ชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบตัวกวน 2,000 rpm เวลากดแช่ 3 s อัตราการกดตัวกวน 8 mm/min

รูปที่ 4.2 แสดงชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2,000 rpm เวลากดแช่ 3 s อัตราการกดตัวกวน 8 mm/min ที่อะลูมิเนียมบางส่วนที่ติดบริเวณบ่าตัวกวนและบางส่วนไหลขึ้นสู่ด้านบนของผิววัสดุ ล้นออกมาอยู่ภายใต้บริเวณบ่าเครื่องมือเชื่อม ไม่ล้นออกมารอบๆ เครื่องมือเชื่อมทำให้การสอดตัว กวนกระทำไม่ถึงบริเวณอินเตอร์เฟซ ดังรูปที่ 4.2 (ก) จึงทำให้การผสมของวัสดุเกิดได้น้อยทำให้ ชิ้นทดสอบทั้งสองชิ้นไม่สามารถติดกันได้ ดังรูปที่ 4.2 (ข) และดังรูปที่ 4.2 (ค) ที่ความเร็วรอบตัวกวน 4,000 rpm เวลาการกดแช่ที่ 2 s อัตราการกดตัวกวน 8 mm/min หลังจากทำการเชื่อมเสร็จ พบว่า ผิวหน้ารอยเชื่อมเป็นมันวาวและมีอะลูมิเนียมไหลขึ้นสู่ด้านบนของผิววัสดุเชื่อมล้นออกมามีลักษณะ เป็นครีบริบรอบๆ เครื่องมือเชื่อม ดังรูปที่ 4.3 (ก) เมื่อยกชิ้นงานเชื่อมออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน แล้ว ทำการขยับชิ้นงานเชื่อม ปรากฏว่าชิ้นงานเชื่อมเกิดการขยับตัวเล็กน้อยแต่ยังไม่หลุดออกจากกัน และ เมื่อทำการทดสอบแรงดึงแบบกากบาทเบื้องต้น พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าต่ำ การพังทลายของรอย เชื่อมเกิดขึ้นบริเวณการกวน (SZ) ซึ่งจากรูปที่ 4.3 (ข) และรูปที่ 4.3 (ค) แสดงให้เห็นว่าได้บ่าตัวกวน ของรอยเชื่อมนั้นไม่พบการอินเตอร์เฟซ ระหว่างชิ้นงานเชื่อมแผ่นบนและชิ้นงานเชื่อมแผ่นล่าง ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อม ด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 และ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ของ ธวัช หมีเฟื่อง ที่ได้รายงานไว้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการเชื่อม มากเกินไปก็จะทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าลดลง [23]



(ก) ด้าน A

(ข) ด้าน B

(ค) ด้าน C

รูปที่ 4.3 ชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบตัวกวน 4,000 rpm เวลาทดแซ่ 3 s

ดังนั้นงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 2,500 rpm 3,000 rpm และ 3,500 rpm ระยะเวลาทดแซ่ 2 s 3 s และ 4 s ตัวกวนมีความยาวหัวกวน (Pin) เป็น 3 ระดับ คือ ความยาว 1 mm ความยาว 1.4 mm ความยาว 1.7 mm ความลึกของบ่าตัวกวน 0.2 mm ส่งผลให้ระยะในการสอดตัวกวน มี 3 ระดับ คือ ความยาวหัวกวน 1 mm ระยะการสอดตัวกวน 1.2 mm ความยาวหัวกวน 1.4 mm ระยะการสอดตัวกวน 1.6 mm และความยาวหัวกวน 1.7 mm ระยะการสอดตัวกวน 1.9 mm กำหนดค่าตัวแปรการทดลองในเบื้องต้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการกำหนดตัวแปร ในการทดลองโดยกำหนดอัตราการกดตัวกวนที่ 8 mm/min

## 4.2 อิทธิพลของเวลาทดแซ่ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท

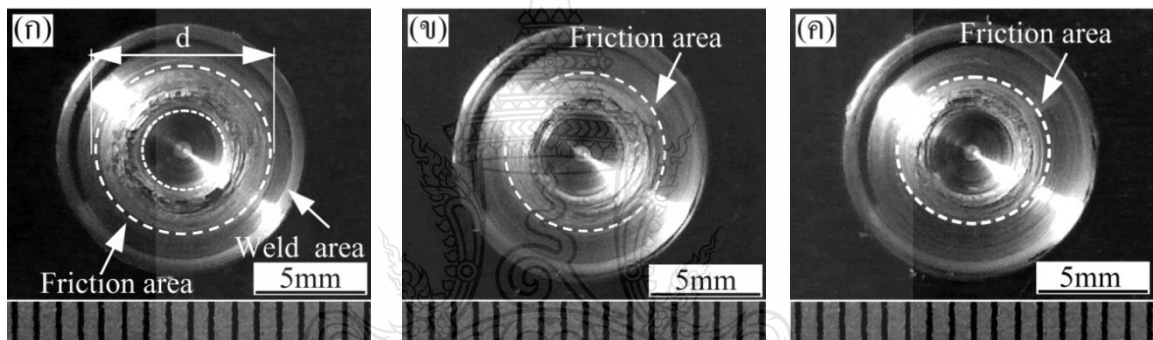
การศึกษาอิทธิพลของเวลาทดแซ่ที่ส่งผลต่อสมบัติของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA 1100 และอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA 5052 ตัวแปรที่ใช้ในการการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุนกวน 2 ระดับ 2500-3000 rpm 3 ระดับ เวลาทดแซ่ 2-4 s ความยาวปลาย ตัวกวน 1 mm ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

### 4.2.1 การตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2,500 rpm

รูปที่ 4.4 แสดงรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดที่มีเวลาทดแซ่ต่างกัน พบว่าหลังจากการทำการเชื่อมเสร็จเรียบร้อยปรากฏว่ารอยเชื่อมมีลักษณะเป็นวงกลม ดังรูปที่ 4.4 และพบว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมเกิดครีบบริเวณขอบที่เกิดจากการแรงเสียดสีและแรงกดของตัวกวน ทำให้เกิดการดันตัวของเนื้อโลหะส่งผลให้เกิดครีบบริเวณขอบแนวเชื่อมซึ่งมีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 1 mm และมีความสูงประมาณ 0.4 mm เมื่อพิจารณาผิวหน้ารอยเชื่อมเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ เวลาทดแซ่ตัวกวนต่างกัน คือ 2-4 s พบว่าที่เวลาทดแซ่ต่ำ ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เวลาทดแซ่ 2 s ส่งผลให้ผิวหน้ารอยเชื่อมที่มีพื้นที่การเสียดทานสูงดังลูกศรชี้ ซึ่งมีความกว้างการเสียดทานระยะ d เฉลี่ยประมาณ



7.8 mm ดังรูปที่ 4.4 (ก) เมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผิวหน้ารอยเชื่อมมีพื้นที่การเสียดทานลดลง ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เวลาทดสอบ 3 s มีพื้นที่การเสียดทานเฉลี่ยประมาณ 7.1 mm ดังรูปที่ 4.4 (ข) และ ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เวลาทดสอบ 4 s มีพื้นที่การเสียดทานเฉลี่ยประมาณ 6.6 mm ดังรูปที่ 4.4 (ค) จากรูป กล่าวได้ว่าเวลาทดสอบมีผลต่อผิวหน้ารอยเชื่อมเมื่อเวลาทดสอบต่ำส่งผลให้ผิวหน้ารอยเชื่อมมีพื้นที่การเสียดทานสูง และเวลาทดสอบสูงส่งผลให้บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมมีพื้นที่การเสียดทานต่ำ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำชิ้นงานเชื่อมขัดดูโครงสร้างมหภาค พบว่าภายในรอยเชื่อมเกิดรูปทรงผิวสัมผัสมีรูปทรงคล้ายตะขอ (Hook-like interface) ซึ่งรูปทรงดังกล่าว เกิดจากลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่อ่อนตัวลงด้วยความร้อนแรงเสียดสีจากปลายตัวและปาดตัวจนประกอบกับแรงกดจากของตัวแกน [27] ทำให้เกิดการไหลตัวของเนื้อโลหะที่ถูกผลักลงไปใกล้พื้นผิวด้านล่างจากนั้นและไหลตัวขึ้นไปด้านบนทำให้เกิดเป็นรูปทรงผิวสัมผัสรูปทรงคล้ายตะขอ [28]

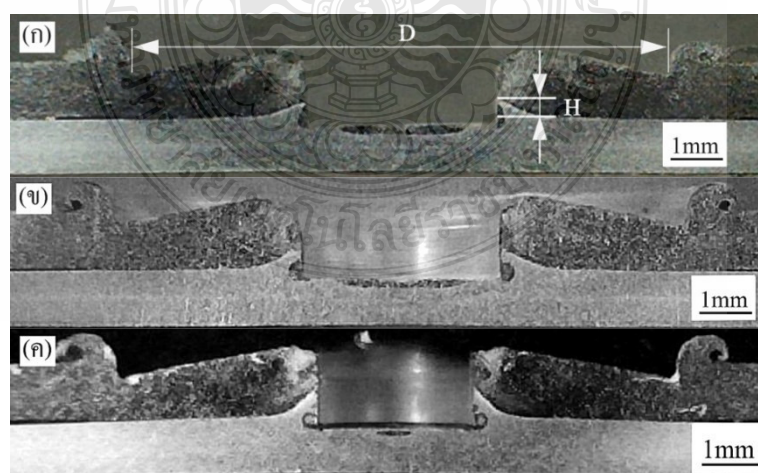


(ก) เวลาทดสอบ 2 s

(ข) เวลาทดสอบ 3 s

(ค) เวลาทดสอบ 4 s

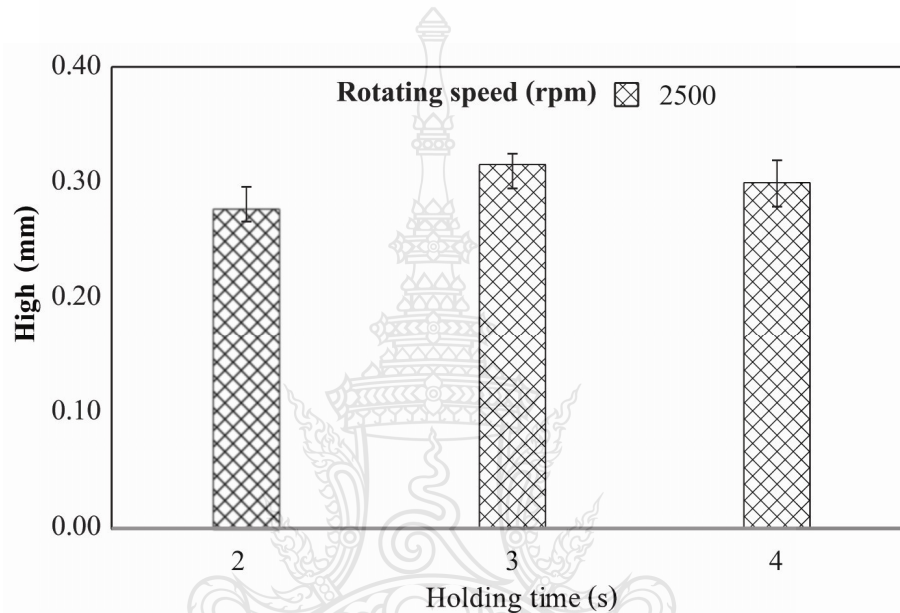
รูปที่ 4.4 ผิวหน้ารอยเชื่อมความยาวปลายตัวแกน 1 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm



รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมความยาวปลายตัวแกน 1 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm

(ก) เวลาทดสอบ 2 s (ข) เวลาทดสอบ 3 s (ค) เวลาทดสอบ 4 s

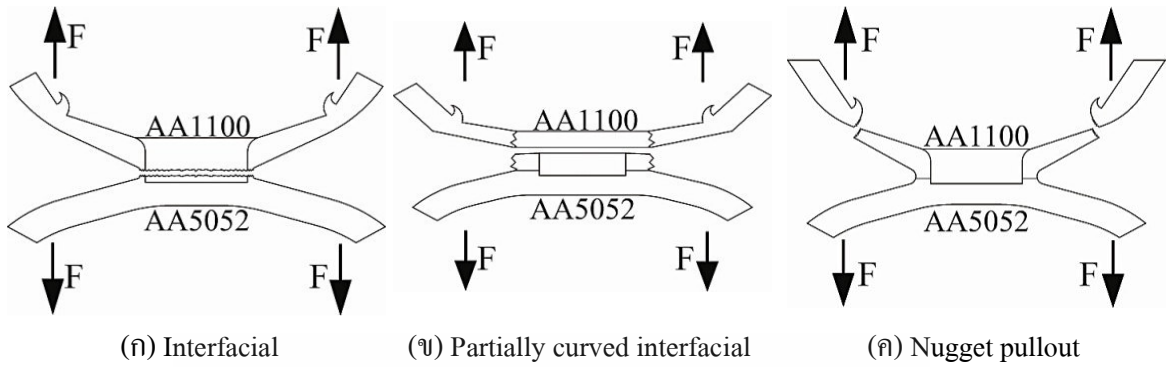
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสูงผิวสัมผัสสกล้ายตะขอของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm เวลากดแช่ 2-4 s พบว่าเมื่อสภาวะการเชื่อมเวลากดแช่มีค่าต่ำส่งผลให้ความสูงผิวสัมผัสรูปทรงกล้ายตะขอต่ำ เวลากดแช่ 2 s ความสูงของตะขอเฉลี่ย 0.277 mm เมื่อเวลากดแช่ตัวกวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสูงผิวสัมผัสสกล้ายตะขอมีค่าสูงขึ้นที่เวลากดแช่ 3 s ให้ค่าความสูงตะขอสูงเฉลี่ย 0.315 mm แต่เมื่อความเร็วรอบตัวกวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสูงผิวสัมผัสสกล้ายตะขอมีแนวโน้มต่ำลงระดับความเร็วรอบ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 ความสูงผิวสัมผัสสกล้ายตะขอ ความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm

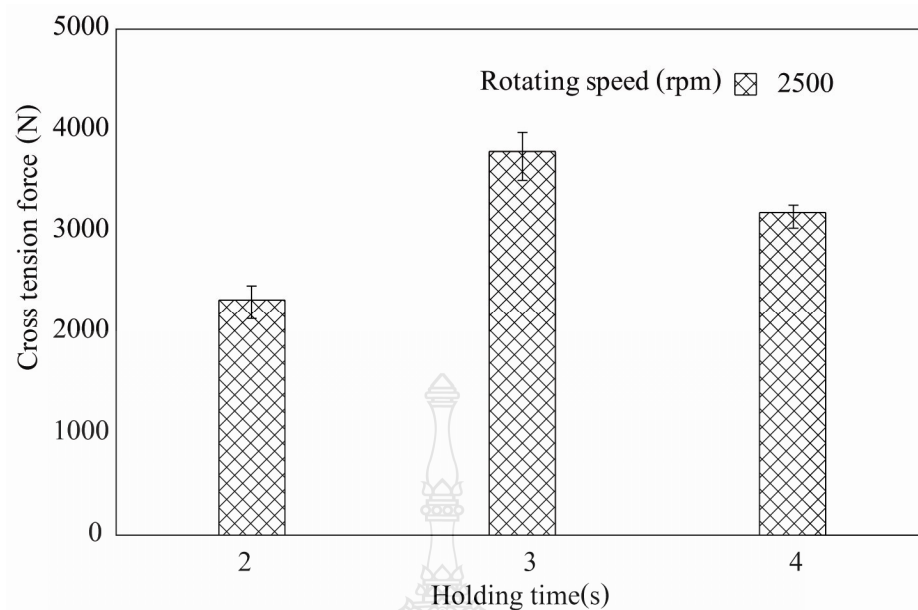
#### 4.2.2 การทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อม

รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ซึ่งพบว่าการพังทลายของชิ้นงานทดสอบเมื่อผ่านการทดสอบแรงดึงเกิดขึ้น 3 ลักษณะคือ การพังทลายที่หน้าสัมผัส (Interfacial fracture) เป็นการพังทลายบริเวณอินเทอร์เฟซของโลหะเชื่อมทั้งสองสองแผ่น การพังทลายแบบหน้าสัมผัสบางส่วน (Partially curved interfacial) เป็นการพังทลายที่บริเวณใต้บ่าตัวกวนแต่มีโลหะแผ่นบนติดอยู่กับโลหะเชื่อมแผ่นล่าง และการพังทลายแบบก้อนเลื่อนออก (Nugget pullout) เป็นการพังทลายที่บริเวณขอบบ่าตัวกวน ลักษณะ คล้ายถ้วย เป็นการพังทลายเหนียว [29] ดังรูปที่ 4.7



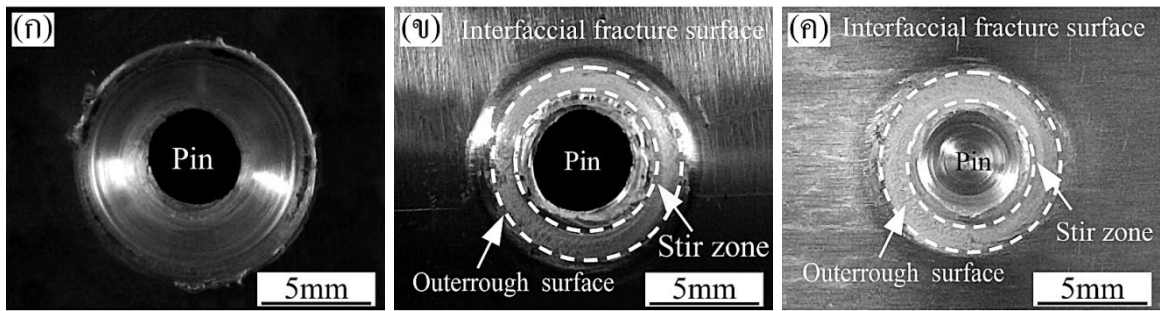
รูปที่ 4.7 รูปแบบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อม

รูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด ที่ความยาวปลายตัวกวน 1 mm ระยะการสอดตัวกวน 1.2 mm เมื่อทำการเชื่อมที่เวลากดแช่ต่างกัน และทำทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาท พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าความสูงรูปทรงผิวสัมผัสสกล้ายตะขอกับค่าความแข็งแรงดึงนั้น พบว่าเมื่อสภาวะการเชื่อมเวลากดแช่มีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลรูปทรงความสูงผิวสัมผัสสกล้ายตะขอมีค่าต่ำ ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อมมีค่าต่ำ แสดงที่ ความเร็วรอบตัวกวน 2,500 rpm เวลากดแช่ 2 s ประมาณค่าความแข็งแรงดึงที่ 2,310 N แต่เมื่อเวลากดแช่เพิ่มขึ้นที่เวลากดแช่ 3 s พบว่าความสูงผิวสัมผัสสกล้ายตะขอเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.5 ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงแบบกากบาทเพิ่มขึ้น ประมาณค่าความแข็งแรงดึงที่ 3,780 N และเมื่อเวลากดแช่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงแบบกากบาท มีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.8 ประมาณค่าความแข็งแรงดึงที่ 3173 N ซึ่ง Bozzi et al [30] ได้รายงานไว้ว่าลักษณะตะขอที่เกิดขึ้นภายในรอยเชื่อมนั้นมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม ซึ่งความสูงของตะขอน้อยส่งผลให้ความแข็งแรงดึงต่ำ ความสูงของตะขอมากขึ้นส่งผลให้แข็งแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งได้รับผลกระทบจากความเร็วรอบในการเชื่อมและเวลากดแช่ และ Yasunari et al [8] ได้รายงานไว้ว่าความสูงของผิวสัมผัสสกล้ายตะขอเพิ่มขนาดขึ้นหรือลดลงนั้น ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและเวลาในการกดแช่ที่กำหนดให้กับเครื่องมือเชื่อมและส่งผลให้เกิดลักษณะการพังทลายที่แตกต่างกัน



**รูปที่ 4.8** ผลกระทบของความเร็วย้อนและเวลากดแช่ต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ความยาวปลายตัวกวน 1 mm

การทดสอบแรงดึงแบบกากบาทพบว่าที่ความเร็วย้อนการกวน 2,500 rpm เวลากดแช่ 2 s ซึ่งเป็นสภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด พบว่าการพังทลายรอยเชื่อมเกิดขึ้นบริเวณการกวน เรียกว่าการพังทลายที่หน้าสัมผัส [29] ซึ่งพื้นผิวการพังทลายสามารถแบ่งเป็นสองส่วนคือผิวการพังทลายด้านใน (Interfacial fracture surface) [31] เป็นการพังทลายที่เกิดขึ้นบริเวณการกวน (Stir Zone) ใกล้แกนตัวกวน (Pin) มีผิวการพังทลายมีสภาพขรุขระความหยาบผิวสูง เนื่องจากผลของการเสียดทานกวนของตัวกวนในกระบวนการเชื่อมทำให้เนื้อโลหะเชื่อมทำให้เกิดการไหลตัวเกิดเป็นรูปทรงผิวสัมผัสรูปทรงคล้ายตะขอ [28] และกวนเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ (Bonded Complete) ดังรูปวงรีขนาดเล็ก รูปที่ 4.9 (ข) และ รูปที่ 4.9 (ค) พบว่าผิวการพังทลายด้านนอก (Outer rough surface) เป็นการพังทลายเกิดขึ้นบริเวณ Thermo-Mechanical Affect Zone (TMAZ) ซึ่งเป็นบริเวณที่เนื้อโลหะเชื่อมได้รับความร้อนจากการเสียดทานและแรงกดจากบ่าตัวกวนทำให้เกิดการเกาะยึดที่ผิวสัมผัส (Bonded Interface) เป็นผลให้ความหยาบผิวลดลงดังวงรีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.9 (ข) และรูปที่ 4.9 (ค) ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ P.-C. Lin(2008) [31] และ V.-X. Tran(2009) [32]

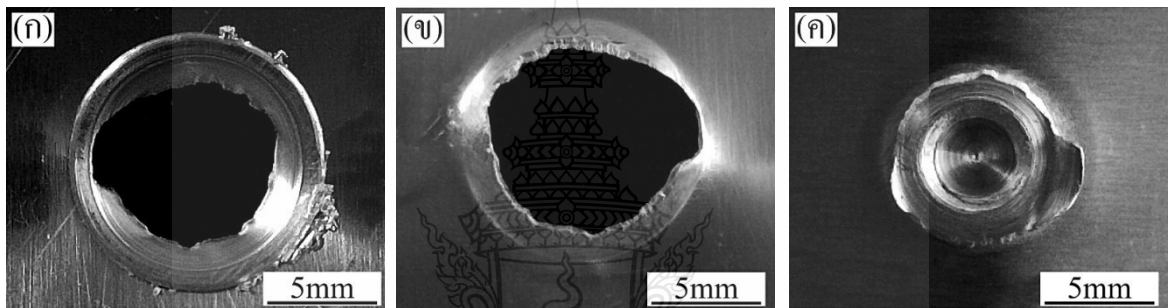


(ก) ด้าน A

(ข) ด้าน B

(ค) ด้าน C

รูปที่ 4.9 การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 2 s ที่ความยาวปลายตัวกาน 1 mm



(ก) ด้าน A

(ข) ด้าน B

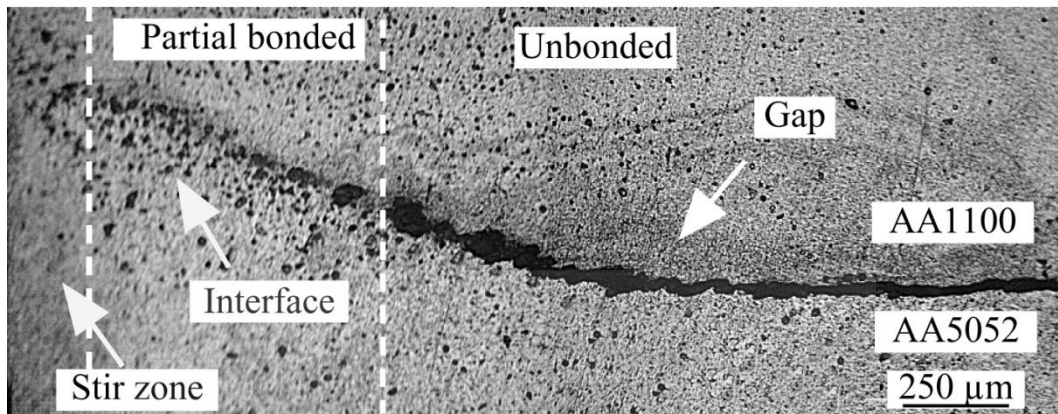
(ค) ด้าน C

รูปที่ 4.10 การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 3 s ที่ความยาวปลายตัวกาน 1 mm

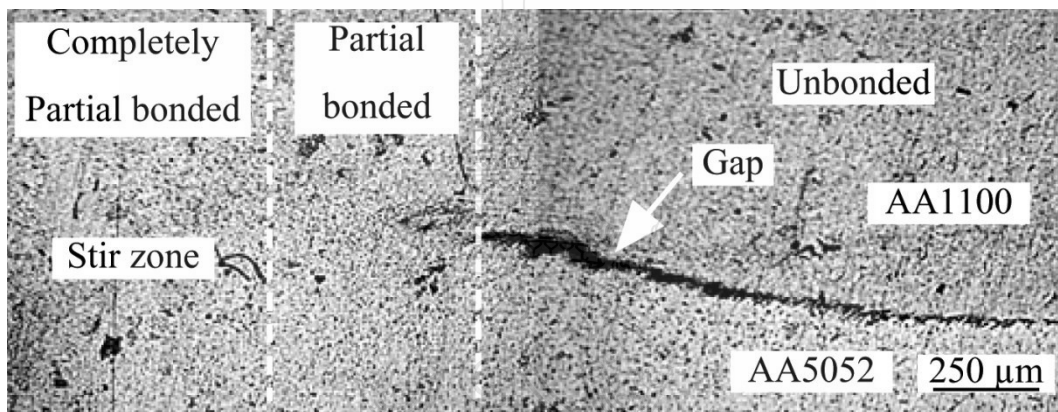
รูปที่ 4.10 แสดงผลกระทบของความเร็วรอบและเวลาทดสอบต่อการพังทลายที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 3 s เป็นสภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงถึงสูงสุด พบว่าการพังทลายเกิดขึ้นบริเวณใต้ปากตัวกาน รอยเชื่อมเกิดจากการกวนเข้ากันและการรวมตัวของเนื้อโลหะเชื่อม (bonded) สมบูรณ์กว่า เวลาทดสอบ 2 s ซึ่งพบว่าเมื่อลุ่มิเนียมผสมเกรด AA1100 ติดอยู่ที่แผ่นโลหะเชื่อมแผ่นล่าง AA5052 บางส่วนและจากการพังทลายส่งผลให้ขอบการพังทลายมีลักษณะแบบฟันปลา ดังรูปที่ 4.10 (ค) เมื่อพิจารณาการพังทลายของรอยเชื่อม พบว่าการพังทลายเป็นแบบ Partially curved interfacial [29] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 3 s นั้น รูปแบบการพังทลายไม่ได้เกิดขึ้นผ่านบริเวณการเชื่อมระหว่างแผ่นวัสดุเชื่อมแต่เกิดที่วัสดุเชื่อม ดังรูปที่ 4.10 (ข) และดังรูปที่ 4.10 (ค) เนื่องจากรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมนี้มีค่าความแข็งแรงกว่าโลหะเชื่อม [22]



#### 4.2.3 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม



(ก) โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เวลาถดเซ 2s



(ข) โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เวลาถดเซ 3s

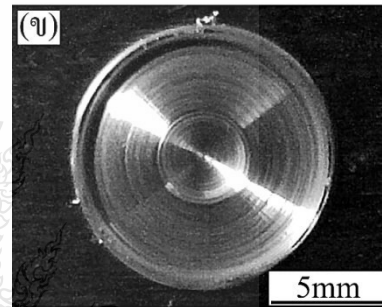
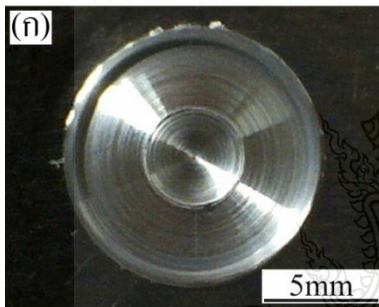
รูปที่ 4.11 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ความเร็วรอบตัวกวน 2500 rpm เวลาถดเซ 2-4 s กำลังขยาย 50 x

รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เวลาถดเซ 2-4 s ความเร็วรอบตัวกวน 2500 rpm ความยาวปลายตัว 1 mm กำลังขยาย 50 เท่า ตรวจสอบบริเวณการเกิดผิวสัมผัสคล้ายตะขอ ซึ่งที่เวลาถดเซ 2 s เกิดการพังทลายการพังทลายแบบหน้าสัมผัส [29] ดังรูปที่ 4.9 เมื่อตรวจสอบโครงสร้าง พบว่าบริเวณใกล้ปลายตัวกวน (pin) เกิดการกวนเข้าด้วยกันอย่างไม่สมบูรณ์ ความกว้างบริเวณการกวน (Stir zone) น้อย และพบว่าบริเวณอินเทอร์เฟซเกิดโพรงขึ้นทำให้โลหะเชื่อมทั้งสองเชื่อมติดเพียงบางส่วน (Partial bonded) พบว่าบริเวณบริเวณใต้บ่าตัวกวนเกิดช่องว่าง (Gap) ระหว่างโลหะเชื่อมซึ่งเกิดจากการไม่รวมตัวกันของโลหะเชื่อม ดังรูปที่ 4.11 (ก) ผลมาจากระยะเวลาในการเสียดทานกวนที่สั้น เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเวลาถดเซ 3 s ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่านั้น จะเห็นได้ว่าความกว้างบริเวณการกวนเพิ่มขึ้นและบริเวณใต้บ่า

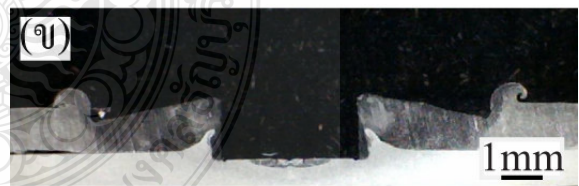
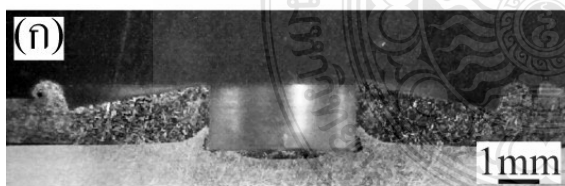
ตัวกวนเกิดอินเทอร์เฟสลักษณะแบบฟืนปลา และที่เวลากดแช่ 4 s พบว่าความสูงบริเวณผิวสัมผัส คล้ายตะขอลดลงดังรูปที่ 4.6

#### 4.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อม ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2,500 rpm

รูปที่ 4.12 แสดงรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดที่มีเวลากดแช่ต่างกัน พบว่าหลังจากการทำกรเชื่อมเสร็จเรียบร้อยปรากฏว่ารอยเชื่อมมีลักษณะเป็นวงกลม ดังรูปที่ 4.4 และพบว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมเกิดครีบซึ่งเกิดจากการแรงเสียดสีและแรงกดของตัวกวน ทำให้เกิดการดันตัวของเนื้อโลหะส่งผลให้เกิดครีบบริเวณขอบแนวเชื่อมซึ่งมีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 1 mm และมีความสูงประมาณ 0.4 mm เมื่อพิจารณาผิวหน้ารอยเชื่อมเปรียบเทียบบรอยเชื่อมที่ เวลากดแช่ตัวกวนต่างกัน คือ 2-4 s พบว่าที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 2 s ส่งผลให้ผิวหน้ารอยเชื่อมเรียบเป็นมันวาว ซึ่งแตกต่างจากความเร็วรอบ 2,500 rpm รูปที่ 4.4

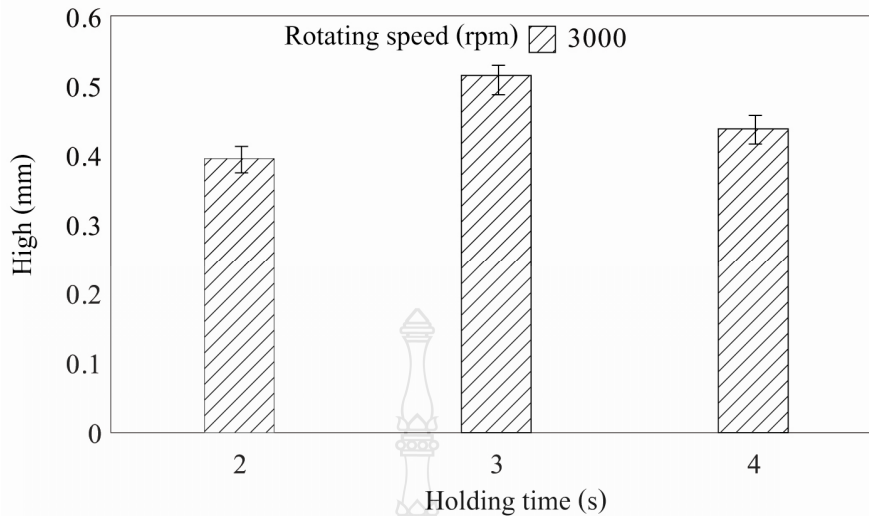


(ก) ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 2 s      (ข) ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 3 s  
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผิวหน้ารอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ความเร็วรอบ 3,000 rpm



(ก) ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 2 s      (ข) ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 3 s  
รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

รูปที่ 4.13 เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมชุดคูโครงสร้างมหภาค พบว่าภายในรอยเชื่อมเกิดรูปทรงผิวสัมผัสมีรูปทรงคล้ายตะขอ ซึ่งรูปทรงดังกล่าวเกิดจากด้วยความร้อนแรงเสียดสีจากปลายตัวประกอบกับแรงกดจากบ่าตัวกวน ทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวลง [27] ทำให้เกิดการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่ถูกผลักลงด้านล่างจากนั้นและไหลตัวขึ้นไปด้านบนเกิดเป็นรูปทรงผิวสัมผัสรูปทรงคล้ายตะขอ [28]



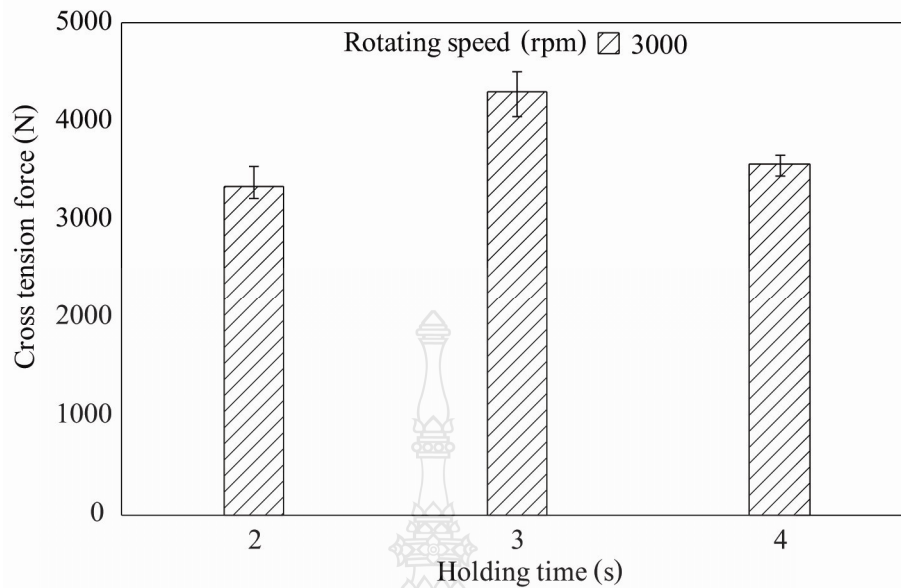
รูปที่ 4.14 ความสูงฟิวส์สัมผัสคล้ายตะขอ ความยาวปลายตัวทวน 1 mm ความเร็วรอบ 3,000 rpm

รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสูงฟิวส์สัมผัสคล้ายตะขอของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ความยาวปลายตัวทวน 1 mm ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 2-4 s พบว่าเมื่อสถานะการเชื่อมเวลากดแช่มีค่าต่ำส่งผลให้ความสูงฟิวส์รูปทรงคล้ายตะขอต่ำ เวลากดแช่ 2 s ความสูงของตะขอเฉลี่ย 0.417 mm เมื่อเวลากดแช่ตัวทวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสูงฟิวส์สัมผัสคล้ายตะขอมีค่าสูงขึ้นที่เวลากดแช่ 3 s ให้ค่าความสูงตะขอสูงเฉลี่ย 0.535 mm แต่เมื่อความเร็วรอบตัวทวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสูงฟิวส์สัมผัสคล้ายตะขอมีแนวโน้มต่ำลงระดับความเร็วรอบ ค่าความสูงตะขอสูงเฉลี่ย 0.44 mm ดังรูปที่ 4.14

#### 4.2.5 การทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อม

รูปที่ 4.15 แสดงค่าความแข็งแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด ที่ความยาวปลายตัวทวน 1 mm ระยะการสอดตัวทวน 1.2 mm เมื่อทำการเชื่อมที่เวลากดแช่ต่างกัน และทำทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาท พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าความสูงรูปทรงฟิวส์สัมผัสคล้ายตะขอกับค่าความแข็งแรงดึงนั้น พบว่าเมื่อสถานะการเชื่อมเวลากดแช่มีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลรูปทรงความสูงฟิวส์สัมผัสคล้ายตะขอมีค่าต่ำ ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงดึงแบบกากบาทรอยเชื่อมมีค่าต่ำ แสดงที่ความเร็วรอบตัวทวน 3,000 rpm เวลากดแช่ 2 s ประมาณค่าความแข็งแรงดึงที่ 3,340 N แต่เมื่อเวลากดแช่เพิ่มขึ้นที่เวลากดแช่ 3 s พบว่าความสูงฟิวส์สัมผัสคล้ายตะขอเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.5 ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงแบบกากบาทเพิ่มขึ้น ประมาณค่าความแข็งแรงดึงที่ 4,302 N และเมื่อเวลากดแช่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงแบบกากบาท มีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.15 ประมาณค่าความแข็งแรงดึงที่ 3,561 N

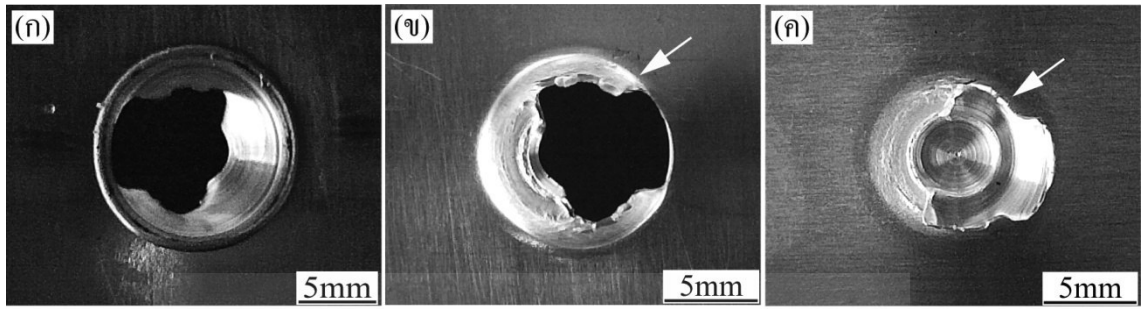




รูปที่ 4.15 ผลกระทบของความเร็วยรอบและเวลากดแช่ต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ความยาวปลายตัวกวน 1 mm

Bozzi et al [30] และ Yasunari et al [8] ได้รายงานไว้ว่าลักษณะตะขอที่เกิดขึ้นภายในรอยเชื่อมนั้นมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม ซึ่งความสูงของตะขอน้อยส่งผลให้ความแข็งแรงดึงต่ำ ความสูงของตะขอมากขึ้นส่งผลให้แข็งแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งได้รับผลกระทบจากความเร็วยรอบในการเชื่อมและเวลากดแช่ และความสูงของผิวสัมผัสคล้ายตะขอเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วยรอบและเวลาในการกดแช่ที่กำหนดให้กับเครื่องมือเชื่อมและส่งผลให้เกิดลักษณะการพังทลายที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบของความเร็วยรอบและเวลากดแช่ต่อการพังทลายที่ความเร็วยรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 2 s เป็นสภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด พบว่าการพังทลายเป็นแบบ Partially curved interfacial [29] การพังทลายเกิดขึ้นบริเวณใต้บ่าตัวกวน รอยเชื่อมเกิดจากการกวนเข้ากันและการรวมตัวของเนื้อโลหะเชื่อม (bonded) สมบูรณ์น้อย ซึ่งพบว่ามีอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 ติดอยู่ที่แผ่นโลหะเชื่อมแผ่นล่าง AA5052 บางส่วน และจากการพังทลายส่งผลให้ขอบการพังทลายมีลักษณะแบบฟันปลา ดังรูปที่ 4.16 (ค) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการพังทลายของรอยเชื่อม รูปแบบการพังทลายเกิดขึ้นผ่านบริเวณการเชื่อมระหว่างแผ่นวัสดุเชื่อมบางส่วน แต่เกิดที่วัสดุเชื่อม ดังรูปที่ 4.10 (ข) และดังรูปที่ 4.10 (ค) เนื่องจากรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมนี้มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าโลหะเชื่อม [22]

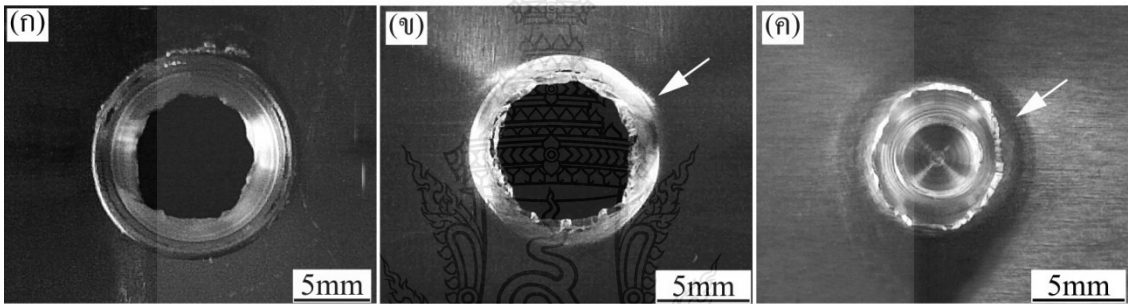


(ก) ด้าน A

(ข) ด้าน B

(ค) ด้าน C

รูปที่ 4.16 การพังทลายของรอยเชื่อมความเร็วรอบ 3000 rpm เวลากดแช่ 2 s ความยาวปลายตัวกวน 1 mm



(ก) ด้าน A

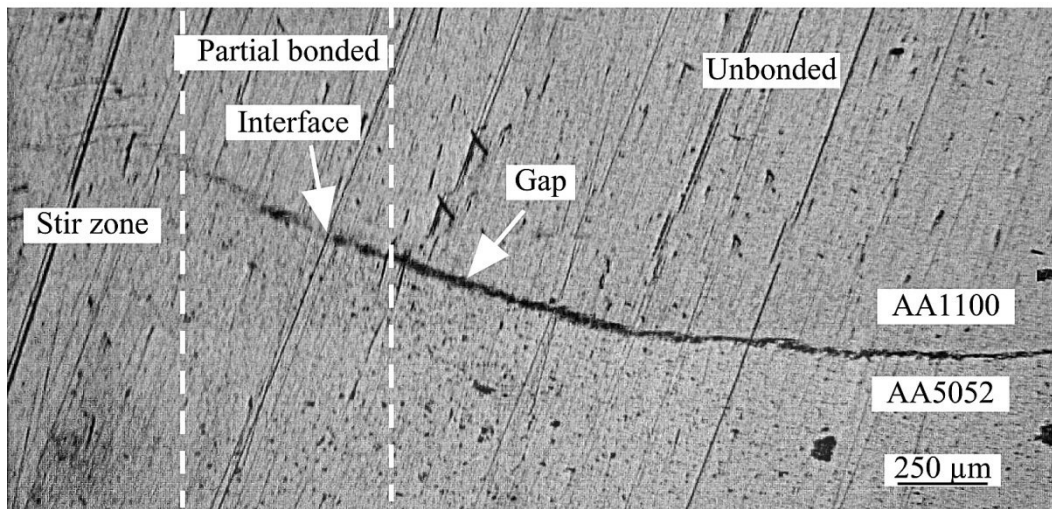
(ข) ด้าน B

(ค) ด้าน C

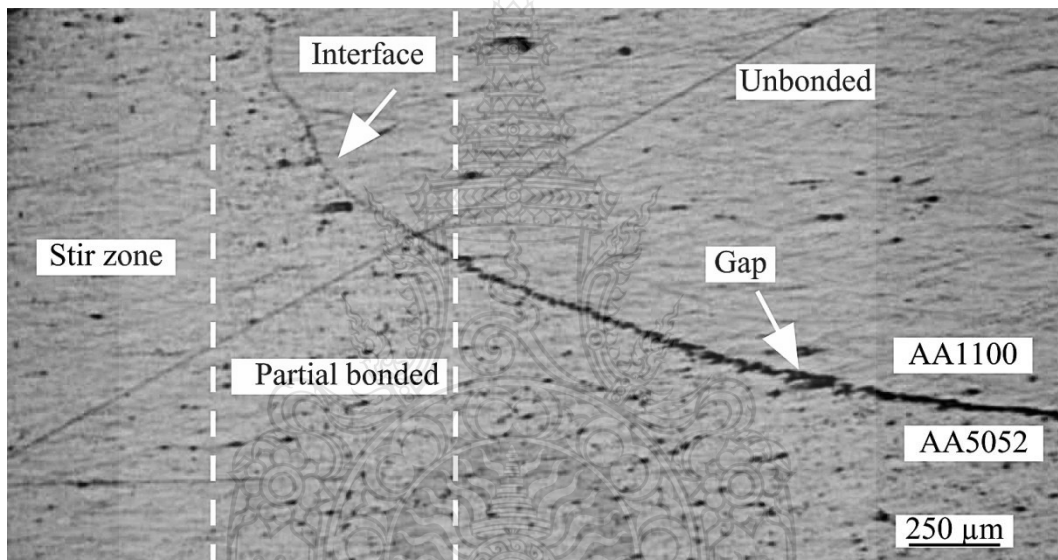
รูปที่ 4.17 การพังทลายของรอยเชื่อมความเร็วรอบ 3000 rpm เวลากดแช่ 3 s ความยาวปลายตัวกวน 1 mm

รูปที่ 4.17 แสดงผลกระทบของความเร็วรอบและเวลากดแช่ต่อการพังทลายที่ความเร็วรอบ 3000 rpm เวลากดแช่ 3 s เป็นสภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงถึงสูงสุด พบว่าการพังทลายเกิดขึ้นบริเวณใต้ปากตัวกวน รอยเชื่อมเกิดจากการกวนเข้ากันและการรวมตัวของเนื้อโลหะเชื่อม (bonded) สมบูรณ์กว่า เวลากดแช่ 2 s ซึ่งพบว่าเมื่อลุ่มิเนียมผสมเกรด AA1100 ติดอยู่ที่แผ่นโลหะเชื่อมแผ่นล่าง AA5052 บางส่วนและจากการพังทลายส่งผลให้ขอบการพังทลายมีลักษณะแบบฟันปลา ดังรูปที่ 4.17 (ค) เมื่อพิจารณาการพังทลายรอยเชื่อม พบว่าการพังทลายเป็นแบบ Partially curved interfacial [29] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 3 s นั้นการพังทลายเกิดที่วัสดุเชื่อม ดังรูปที่ 4.17 (ข) และดังรูปที่ 4.17 (ค) เนื่องจากรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมนี้มีค่าความแข็งแรงกว่าโลหะเชื่อม [22]

#### 4.2.6 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม



(ก) โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เวลาทดสอบ 2s



(ข) โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เวลาทดสอบ 3s

รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ความเร็วรอบตัวกวน 3,000 rpm กำลังขยาย 50 x

รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เวลาทดสอบ 2-4 s ความเร็วรอบตัวกวน 3,000 rpm ความยาวปลายตัว 1 mm กำลังขยาย 50 เท่า ตรวจสอบบริเวณการเกิดผิวสัมผัสสลายตะขอ ซึ่งที่เวลาทดสอบ 2 s เมื่อตรวจสอบโครงสร้าง พบว่าบริเวณใกล้ปลายตัวกวน (pin) เกิดการกวนเข้าด้วยกัน อย่างไม่สมบูรณ์ ความกว้างบริเวณการกวน (Stir zone) น้อย และพบว่าบริเวณอินเทอร์เฟซเกิดโพรงขึ้นทำให้โลหะเชื่อมทั้งสองเชื่อมติดเพียงบางส่วน (Partial bonded) พบว่าบริเวณบริเวณใต้ปลายตัวกวนเกิดช่องว่าง (Gap) ระหว่างโลหะเชื่อมซึ่งเกิดจากการไม่รวมตัวกัน

ของโลหะเชื่อม ดังรูปที่ 4.18 (ก) ผลมาจากระยะเวลาในการเสียดทานกวนที่สั้น เมื่อเปรียบเทียบกับ รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเวลาทดแช่ 3 s ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่านั้น จะเห็นได้ว่าความกว้างบริเวณ การกวนเพิ่มขึ้นและบริเวณใต้ปาดัวกวนเกิดอินเทอร์เฟซลักษณะแบบพื้นปลา และความสูงผิวสัมผัส ค้ำยตะขอ

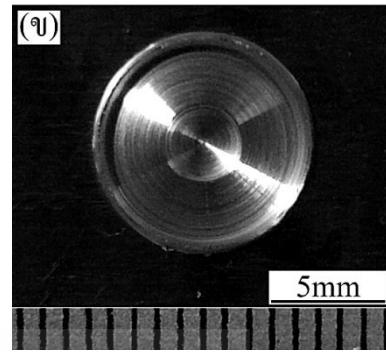
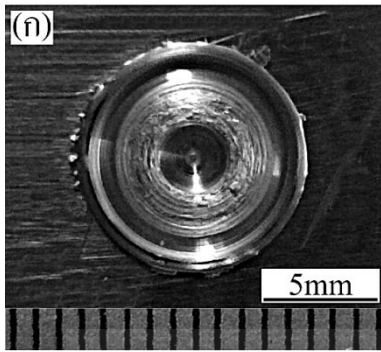
สรุปจากการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบ 2500-3000 rpm เวลาทดแช่ 2-4 s ความยาว ปลาย ตัวกวน 1 mm พบว่าความเร็วรอบตัวกวน 3,000 rpm เวลาทดแช่ 3 s ให้ค่าความแข็งแรงดึงแบบ กากบาทสูงสุด ที่ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 4302 N ผลมาจากความสูงของผิวสัมผัสค้ำย ตะขอและบริเวณการกวนที่เพิ่มขึ้นแต่เมื่อเวลาทดแช่เพิ่มขึ้นพบว่าค่าความแข็งแรงดึงแบบกากบาท มีแนวโน้มลดลงผลมาจากบริเวณการกวนที่ลดลง

### 4.3 อิทธิพลของความเร็วรอบและความยาวปลายตัวกวนต่อความแข็งแรงดึงแบบกากบาท

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบและความยาวปลายตัวกวนที่ส่งผลต่อสมบัติของรอย เชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA 1100 และอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA 5052 ตัวแปรที่ใช้ในการการเชื่อม ประกอบด้วยเวลาทดแช่ 3 s ความเร็วรอบ 3 ระดับ 2500-3500 rpm ความยาวปลายตัวกวน (pin) 3 ระดับ คือความยาว 1 mm 1.4 mm 1.7 mm ซึ่งผลการทดลองและ วิเคราะห์สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

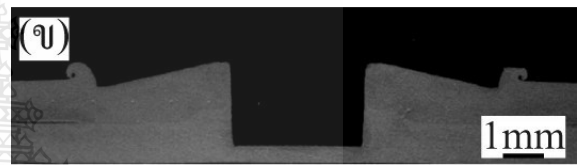
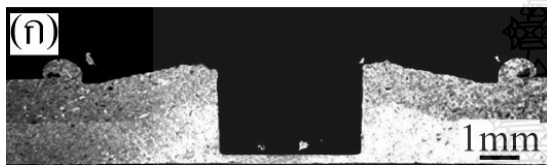
#### 4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อม

รูปที่ 4.19 แสดงรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดที่มีความเร็วรอบและเวลา ทดแช่ต่างกันพบว่ารอยเชื่อมมีลักษณะเป็นวงกลม และพบว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมเกิดจากการ แรงเสียดสีและการดันตัวของเนื้อ โลหะเชื่อมส่งผลให้เกิดครีบบริเวณขอบแนวเชื่อมคล้ายรูปที่ 4.4 พบว่าที่ความเร็วรอบสูงส่งผลให้ผิวหน้ารอยเชื่อมมีความเรียบและพบว่าที่ความเร็วรอบต่ำที่ 2500 rpm ส่งผลให้เกิดความหยาบผิวและลดลงเมื่อความยาวปลายตัวกวนเพิ่มขึ้น จากรูปแสดง ให้เห็นว่าโครงสร้างมหภาค พบว่าภายในรอยเชื่อมเกิดรูปทรงผิวสัมผัสมีรูปทรงคล้ายตะขอ (Hook-like interface) ซึ่งรูปทรงผิวสัมผัสมีรูปทรงคล้ายตะขอต่างกันรูปที่ 4.19 เมื่อตรวจสอบความ สูงของผิวสัมผัสคล้ายตะขอพบว่าที่ความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 2500 rpm ให้ค่าความ สูงต่ำสุดที่ 0.862 mm และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบส่งผลให้ค่าความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อความยาวปลายตัว กวนเพิ่มขึ้นที่ 1.4 mm ส่งผลให้ค่าความสูงของผิวสัมผัสคล้ายตะขอเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ความเร็วรอบ 3000 rpm และความสูงของผิวสัมผัสคล้ายตะขอที่แนวโน้มลดลงที่ความยาวปลายตัวกวนเพิ่มขึ้น ที่ 1.7 mm ดังรูปที่ 4.21



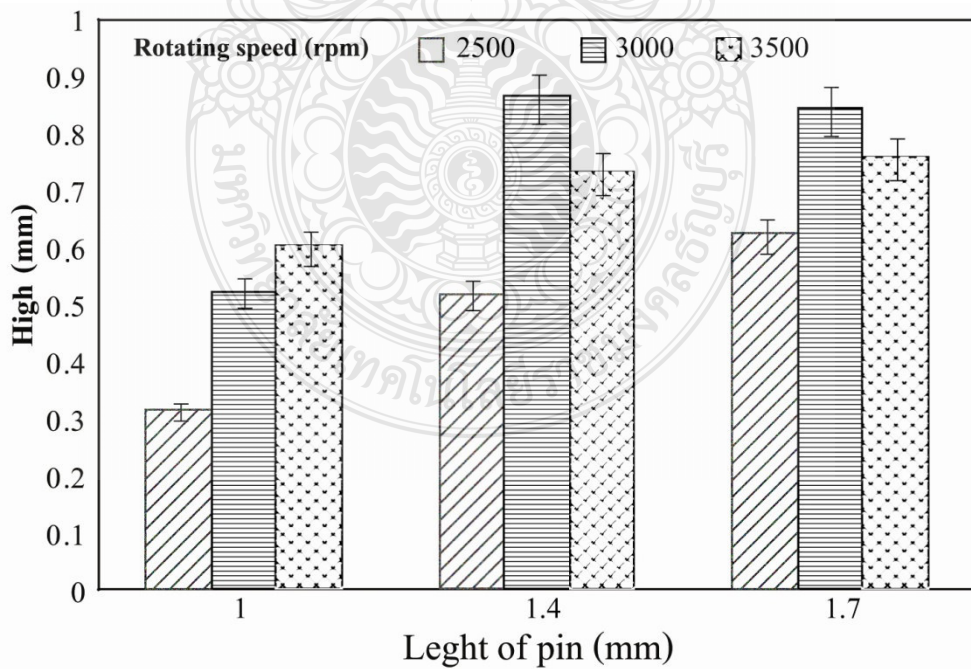
(ก) ความยาวปลายตัวกวน 1.7 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm เวลาทดสอบ 2 s      (ข) ความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลาทดสอบ 3 s

รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบผิวหน้ารอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด



(ก) ความยาวปลายตัวกวน 1.7 mm ความเร็วรอบ 2,500 rpm เวลาทดสอบ 2 s      (ข) ความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลาทดสอบ 3 s

รูปที่ 4.20 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

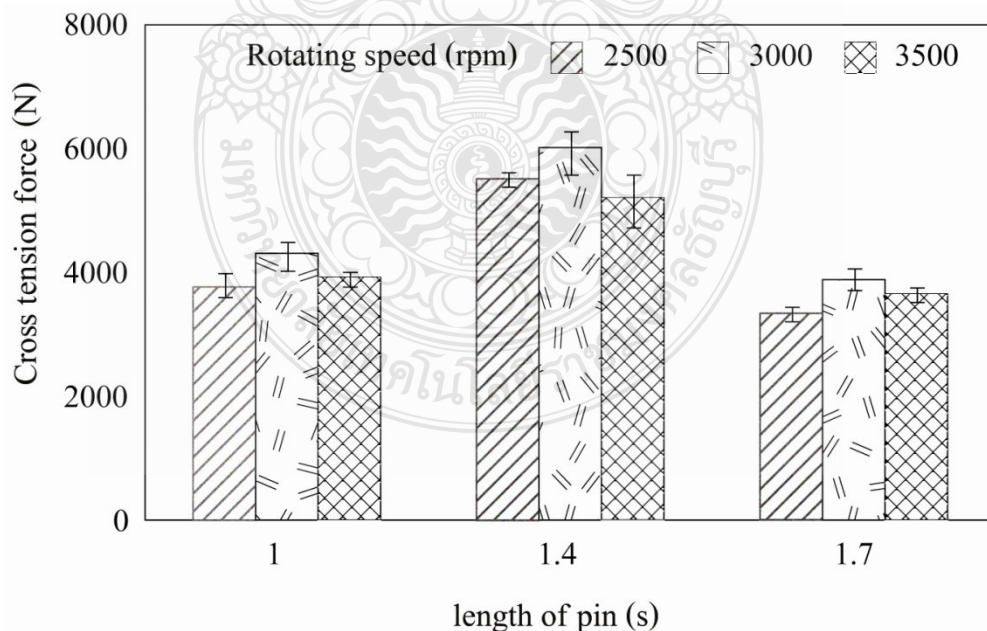


รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบความสูงผิวสัมผัสคล้ายตะขอ ความยาวปลายตัวกวนต่างกัน



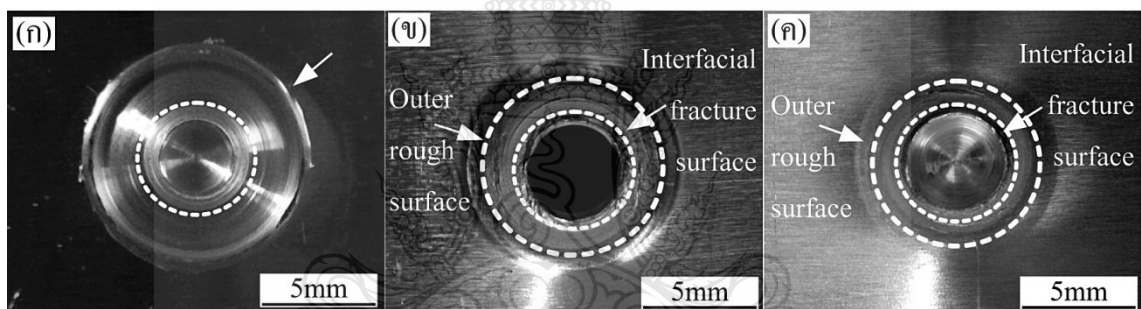
#### 4.3.2 การทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกาทรอยเชื่อม

รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของความเร็รรอบและความยาวปลายตัวกวน ต่อความแข็งแรงดึงแบบกาทรอยเชื่อม ที่เวลาทดสอบ 3 s พบว่าเมื่อความยาวปลายตัวกวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงแบบกาทรอยเชื่อมต่างกัน พบว่าที่ความเร็รรอบ 2500 mm ความยาวปลายตัวกวน 1 mm ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำ ที่ความเร็รรอบ 2500 mm เวลาทดสอบ 3 s เมื่อเพิ่มความเร็รรอบตัวกวนส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงแบบกาทรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความยาวปลายตัวกวน พบว่า เมื่อความยาวปลายตัวกวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นซึ่งผลมาจากการปลายตัวกวนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการดันตัวของเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นและเกิดการเสียดทานบริเวณปลายตัวกวนเพิ่มทำให้การกวนเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ จากรูปที่ 4.22 พบว่าที่ความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm ความเร็รรอบการเชื่อม 3,000 rpm เวลาทดสอบ 3 s เป็นสภาวะที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 6020 N เมื่อความยาวปลายตัวกวนเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มต่ำลง ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tazaki (2007)[8] ซึ่งได้ทำการศึกษารูปทรงของเครื่องมือเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม พบว่าที่ความยาวปลายตัวกวน 1.7 mm ความเร็รรอบตัวกวน 2,500 rpm เวลาทดสอบ 3 s ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด ประมาณค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด 3334 N ซึ่งส่งผลให้เกิดการพังทลายดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบความเร็รรอบและความยาวปลายตัวกวนที่มีผลแรงดึงรอยเชื่อม

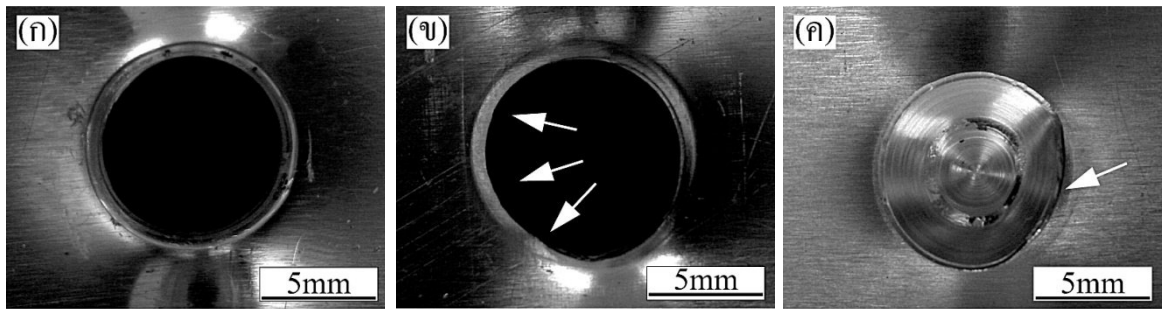
รูปที่ 4.23 แสดงการพังทลายของรอยเชื่อม ที่ความยาวปลายตัวกวน 1.7 mm ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 3 s ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด จากการทดสอบแรงดึงพบว่า การพังทลายของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นผ่านบริเวณ Stir Zone (SZ) พบอะลูมิเนียมบางส่วนติดอยู่บริเวณการกวน ซึ่งการพังทลายเรียกว่า partially curved interfacial ผิวการพังทลายรอยเชื่อมด้านใน มีสภาพขรุขระ ความหยาบผิวสูงกว่า ความเร็วรอบตัวกวน 2,500 rpm เวลาทดสอบ 2 s ความยาวปลายตัวกวน 1 mm เนื่องจากผลของการเสียดทานกวนใน กระบวนการเชื่อมความยาวปลายตัวกวน 1.7 mm สูงกว่า ทำให้เนื้อวัสดุเชื่อมกวนเข้าด้วยกันได้สมบูรณ์กว่าลักษณะผิวการพังทลายบริเวณอินเทอร์เฟซมีความขรุขระสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.23 ดังรูปวงรีขนาดเล็ก รูปที่ 4.23 (ข) และ รูปที่ 4.23 (ค) [31] ผิวการพังทลายด้านนอกของรอยเชื่อม ซึ่งการพังทลายเกิดขึ้นบริเวณบ่าตัวกวนซึ่งได้รับแรงกด และการเสียดทานจากบ่าตัวกวนทำให้เกิดความร้อนทำให้เกิดการเกาะยึดที่ผิวสัมผัสของวัสดุเชื่อม ทั้งสองแผ่นซึ่งบริเวณเป็นผลให้ความหยาบผิวลดลงดังวงรีขนาดใหญ่ดังรูปที่ 4.23 (ข) และ รูปที่ 4.23 (ค)



(ก) แผ่นบนด้านบน AA1100 (ข) แผ่นบนด้านล่าง AA1100 (ค) แผ่นล่างด้านบน AA5052

รูปที่ 4.23 การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 3 s ความยาวปลายตัวกวน 1.7 mm

รูปที่ 4.24 แสดงการพังทลายของรอยเชื่อม ที่ความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm ความเร็วรอบ 3000 rpm เวลาทดสอบ 3 s ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด จากการทดสอบแรงดึงพบว่า การพังทลายของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นขอบรอยเชื่อม พบอะลูมิเนียมบางส่วนติดอยู่บริเวณการกวน ซึ่งเป็นการพังทลายแบบ Nugget Pullout ผิวการพังทลายที่ขอบรอยเชื่อมมีความสม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ความยาวตัวกวน 1 mm ที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 3 s ซึ่งเป็นการพังทลายแบบเหนียว



(ก) แผ่นบนด้านบน AA1100      (ข) แผ่นบนด้านล่าง AA1100      แผ่นล่างด้านบน AA5052

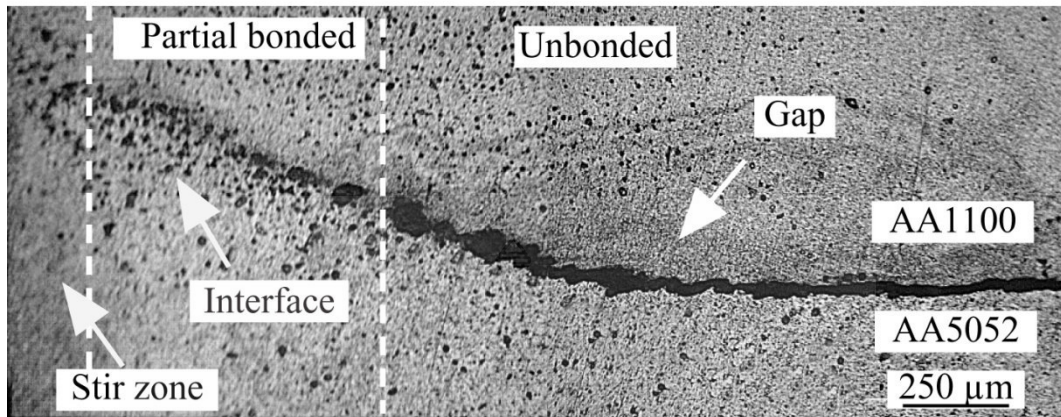
รูปที่ 4.24 การพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 rpm เวลากดแช่ 3 s ความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm

สรุปจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงแบบกากบาทกับความสูงผิวสัมผัสคล้ายตะขอ (Hook) รอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่ความยาวหัวกวนความยาว 1 mm ความยาว 1.4 mm ความยาว 1.7 mm ความลึกของบ่าตัวกวน 0.2 mm ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 2,500 rpm 3,000 rpm และ 3,500 rpm ระยะเวลากดแช่ 2 s 3 s และ 4 s อัตราการกดตัวกวนที่ 8 mm/min พบว่าสถานะตัวแปรที่ส่งผลต่อความสูงผิวสัมผัสคล้ายตะขอ มีความสอดคล้องต่อสถานะ ตัวแปรที่ส่งผลความแข็งแรงดึงแบบกากบาทสูงสุด ซึ่งจากการศึกษาทดลองพบว่าสถานะตัวแปรที่ให้ผลความแข็งแรงดึงแบบกากบาทสูงสุดคือความยาวหัวกวนความยาว 1.4 mm ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 3,000 rpm ระยะเวลากดแช่ 3 s ความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ที่ 6020 N ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแข็งแรงดึงแบบกากบาทเป็นแบบ ลักษณะการพังทลายที่ลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 ลักษณะเป็นรูปถ้วย และสถานะตัวแปรที่ให้ผลความแข็งแรงดึงแบบกากบาทต่ำคือความยาวหัวกวนความยาว 1 mm ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 2,500 rpm ระยะเวลากดแช่ 2 s ความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ที่ 2,310 N ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแข็งแรงดึงแบบกากบาทนี้เป็นแบบ ลักษณะการพังทลายที่บริเวณการกวนเป็นการพังทลายแบบผิวสัมผัส

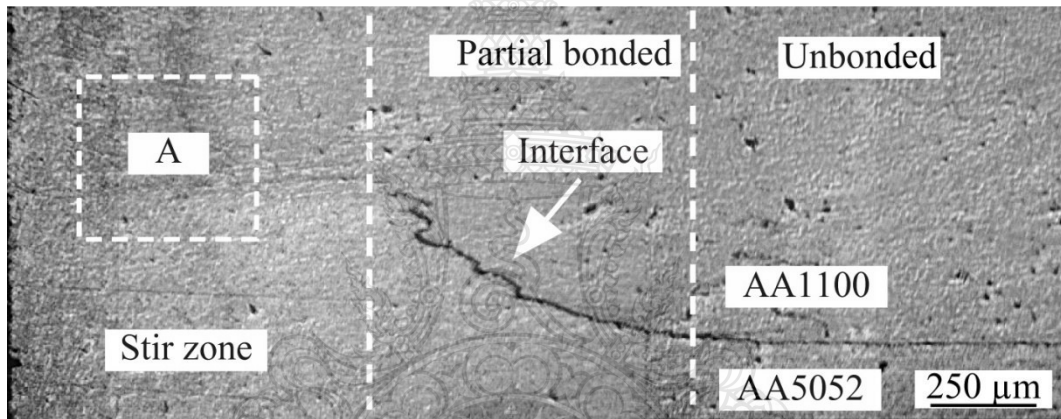


#### 4.4 การตรวจสอบโครงสร้างรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

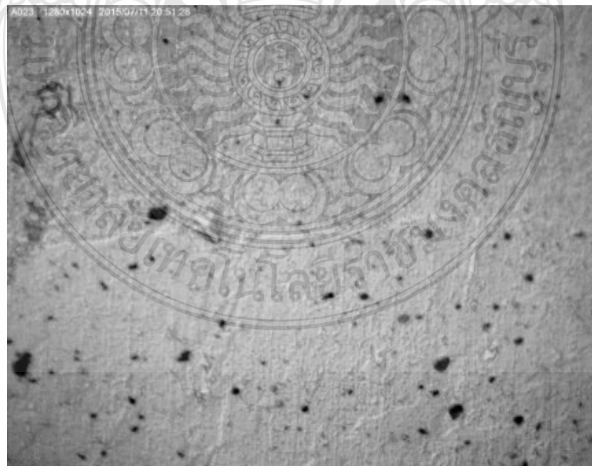
##### 4.4.1 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด



(ก) โครงสร้างมหภาคความยาวปลายตัวกวน 1 mm ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลากดแช่ 2 s



(ข) โครงสร้างมหภาคความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm ความเร็วรอบ 3000 rpm เวลากดแช่ 3 s

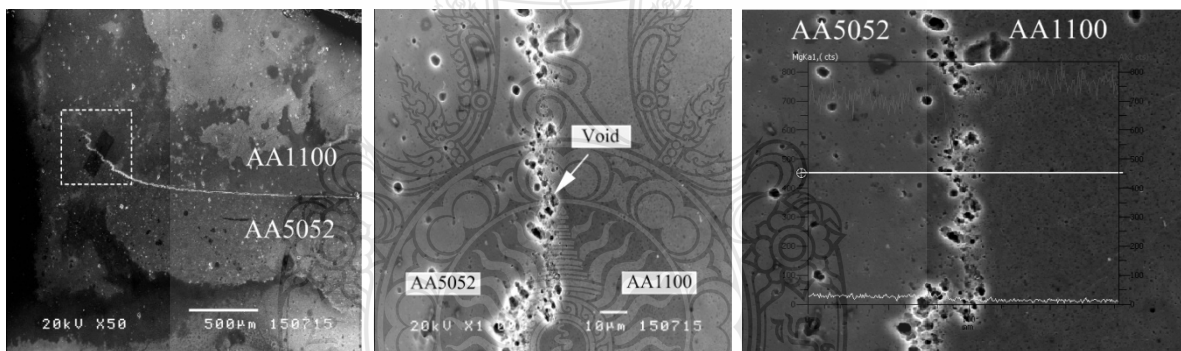


(ค) โครงสร้างมหภาคบริเวณการกวน กำลังขยาย 500 เท่า

#### รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

รูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงแบบกาคบาทกับความสูงผิวสัมผัสคล้ายตะขอ (Hook) รอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ความยาวหัวกวนความยาวและความเร็วรอบตัวกวนเวลาทดแตกต่างกันอัตราการกดตัวกวนที่ 8 mm/min พบว่าความยาวหัวกวนความยาว 1.4 mm ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 3,000 rpm ระยะเวลาทด 3 s ความแข็งแรงดึงสูงสุด และสภาวะตัวแปรที่ความยาวหัวกวนความยาว 1 mm ความเร็วรอบตัวกวน 2,500 rpm เวลาทด 2 s ความแข็งแรงดึงต่ำสุด เมื่อตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค พบว่าที่ความยาวหัวกวนความยาว 1.4 mm เกิดการกวนเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.25 (ก) ความกว้างบริเวณการกวนมาก และพบว่าบริเวณอินเทอร์เฟซมีลักษณะเป็นพื้นปลาดังรูปที่ 4.25 (ข) ทำให้เกิดเกี่ยวกัน (bonded) ของโลหะเชื่อมได้ดี ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงดึงสูง ซึ่งต่างจากสภาวะตัวแปรที่ความยาวหัวกวนความยาว 1 mm เกิดจากแรงเสียดทานได้บ่าตัวกวนต่ำพบว่าบริเวณได้บ่าตัวกวนเกิดการกระจายของโพรงและเกิดช่องว่าง (Gap) ระหว่างอินเทอร์เฟซของโลหะเชื่อม ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงทำให้ความแข็งแรงดึงต่ำ

#### 4.4.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด



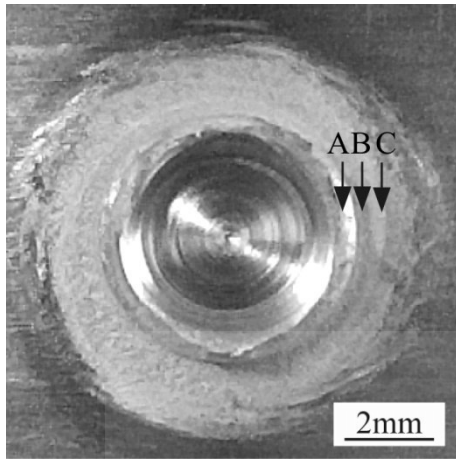
(ก) ผิวสัมผัสคล้ายตะขอ

(ข) บริเวณอินเทอร์เฟซ  
ผิวสัมผัสคล้ายตะขอ

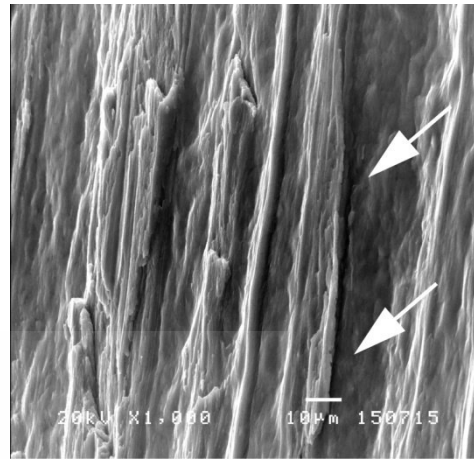
(ค) บริเวณอินเทอร์เฟซผิวสัมผัส  
คล้ายตะขอ

#### รูปที่ 4.26 การตรวจสอบชิ้นงานด้วยอิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณ ผิวสัมผัสคล้ายตะขอ

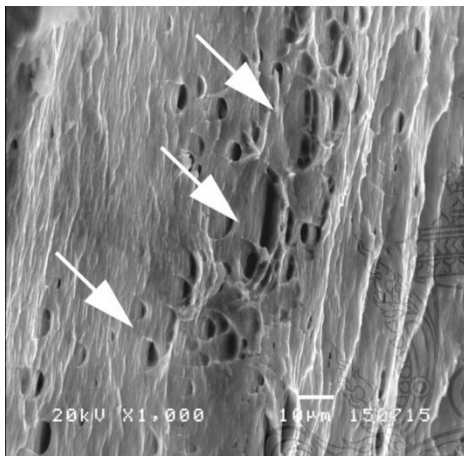
รูปที่ 4.26 ตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดรอยเชื่อมด้านข้างบริเวณอินเทอร์เฟซรูปทรงคล้ายตะขอ (Partial bonded) พบว่าบริเวณดังกล่าวเกิดเป็นช่องว่าง (void) ระหว่างอินเทอร์เฟซของโลหะเชื่อม ดังรูปที่ 4.26 (ข) และพบว่ามี การกระจายตัวของช่องว่างบริเวณโลหะเชื่อม AA 5052 เมื่อทำการวิเคราะห์ส่วนผสมของธาตุผ่านบริเวณผิวสัมผัสคล้ายตะขอ เมื่อตรวจสอบผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซพบว่าปริมาณอะลูมิเนียมลดลงต่ำสุดที่บริเวณอินเทอร์เฟซ



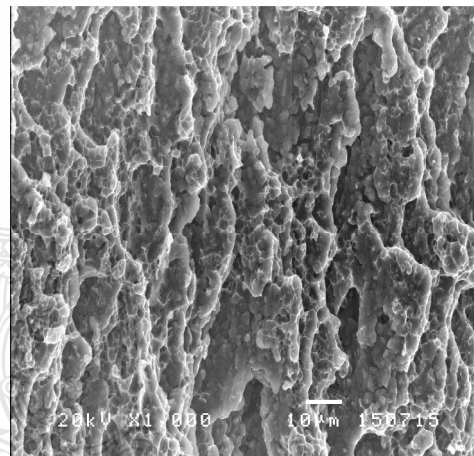
(ก) แผ่นล่างด้านบนรอยเชื่อม



(ข) จุด A บริเวณการกวาน



(ค) จุด B บริเวณการเกิดตะขอ

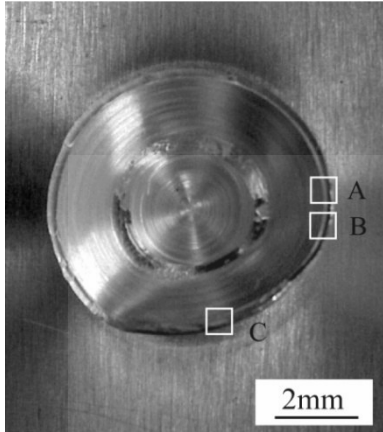


(ง) จุด C บริเวณอินเทอร์เฟส

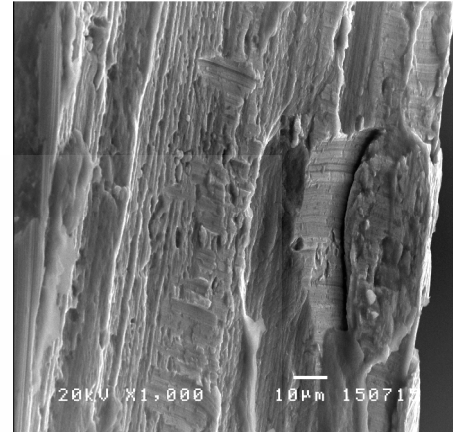
รูปที่ 4.27 รูปถ่าย SEM รอยเชื่อมการพังทลายของแผ่นล่างด้านบนรอยเชื่อมความยาวปลายตัวกวาน 1 mm

รูปที่ 4.27 แสดงการพังทลายของแผ่นล่างด้านบนรอยเชื่อม ที่ความยาวปลายตัวกวาน 1 mm ความเร็วรอบ 2500 rpm เวลาทดสอบ 2 s ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงถึงต่ำสุด พบว่าการพังทลายของรอยเชื่อมที่ผิวเกิดขึ้นนั้นเป็นการพังทลายแบบหน้าสัมผัส พบว่าลักษณะการพังทลายแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบบริเวณการกวานด้วยกำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าบริเวณการกวาน เกิดการพังทลายเป็นลักษณะแนวยาวมีความขนานกับทิศทางการกวานและตั้งฉากกับทิศทางแรงดึง ดังรูปที่ 4.27 (ข) ซึ่งแรงจากการกดอัดจากบ่าและปลายตัวกวานส่งผลให้เกิดการบีบอัดและกวานเข้ากันอย่างสมบูรณ์ของเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งต่างการพังทลายของรอยเชื่อมบริเวณการเกิดผิวสัมผัสตะขอและอินเทอร์เฟส ตรงบริเวณการพังทลายช่วงการเกิดผิวสัมผัสคล้ายตะขอพบว่าการกระจายของโพรงและลักษณะการพังทลายมีลักษณะเป็นวงรีซึ่งเป็นลักษณะการพังทลายของพื้นผิวที่รับแรงเฉือน

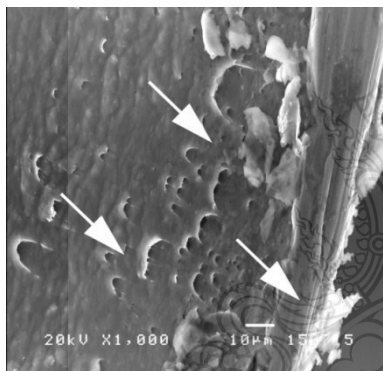
ดังรูปที่ 4.27 (ค) การพังทลายบริเวณอินเทอร์เฟซบริเวณถัดจากบริเวณการเกิดผิวสัมผัสล้ายตะขอ พบว่าพื้นผิวการพังทลายมีลักษณะกลมมนและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.27 (ง)



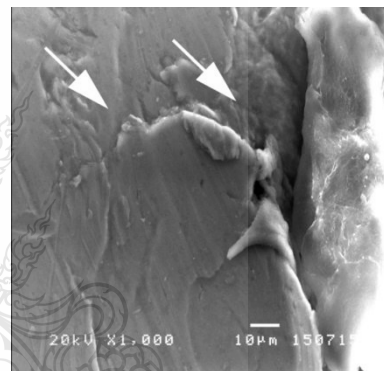
(ก) ด้าน A รอยเชื่อม



(ข) ขอบการพังทลาย จุด A



(ค) ขอบการพังทลาย จุด B



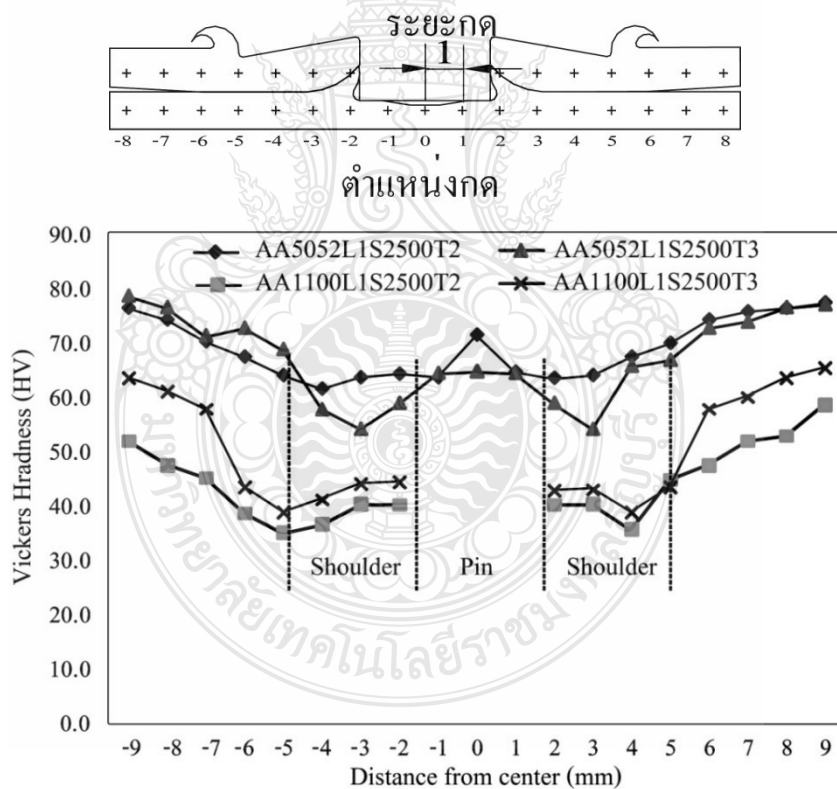
(ง) ขอบการพังทลาย จุด C

**รูปที่ 4.28** รูปถ่าย SEM รอยเชื่อมการพังทลายของแผ่นล่างด้านบนรอยเชื่อมความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm

รูปที่ 4.28 แสดงการพังทลายของแผ่นล่างด้านบนรอยเชื่อม ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด ที่ ความยาวปลายตัวกวน 1.4 mm ความเร็วรอบ 3000 rpm เวลาทดสอบ 3 s ซึ่งพบว่าการพังทลายของ รอยเชื่อม เป็นการพังทลายแบบ nugget pullout เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่อง กราดกำลังขยาย 1000 เท่า บริเวณขอบการพังทลายจุดการพังทลายที่ต่างกัน พบว่าบริเวณขอบการ พังทลายที่จุด A เกิดการพังทลายเป็นลักษณะแนวยาวมีความขนานกับทิศทางการกวนและตั้งฉาก ทิศทางแรงดึงการพังทลายที่จุด B พบว่าผิวการพังทลาย มีลักษณะเป็นวงรีซึ่งเป็นลักษณะการพังทลาย ของพื้นผิวที่รับแรงเฉือน ดังรูปที่ 4.28 (ค) ปลายของขอบการพังทลายพบการยึดตัวของเนื้อโลหะ แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวมีความเหนียวสูง

#### 4.5 การทดสอบความแข็งรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

การทดสอบความแข็งรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด อลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 ทำการทดสอบความแข็งด้วยมาตรฐาน ASTM E 92 การทดสอบความแข็งแบบ Vicker Micro hardness Test กำหนดจุดทดสอบความแข็งตามแนวนอนทั้งหมด 18 จุด แต่ละจุดห่าง 1 mm โดยกำหนดจากกึ่งกลางชิ้นงานเชื่อมเป็นตำแหน่ง 0,0 ซึ่งการทดสอบความแข็งครั้งนี้ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ HUAYIN รุ่น HVS – 1000A ซึ่งทำการทดสอบความแข็งรอยเชื่อมที่สภาวะตัวแปรที่ให้ผลความแข็งแรงดึงแบบกากบาทสูงสุดคือชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความยาวหัวกวนความยาว 1.4 mm ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 3,000 rpm ระยะเวลากดแช่ 3 s อัตราการกดตัวกวนที่ 8 mm/min และที่สภาวะตัวแปรที่ให้ผลความแข็งแรงดึงแบบกากบาทต่ำสุดคือชิ้นงานเชื่อมด้วยความยาวหัวกวนความยาว 1mm ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 2,500 rpm ระยะเวลากดแช่ 2 s อัตราการกดตัวกวนที่ 8 mm/min ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งรอยรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

รูปที่ 4.29 แสดงผลการทดสอบความแข็งรอยรอยเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 และอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 สภาวะตัวแปรที่ความเร็วรอบตัวกวน 2,500 rpm ระยะเวลากดแช่

2 s ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด ความยาวหัวทวน 1 mm และชิ้นงานเชื่อมความยาวหัวทวน 1.4 mm ที่ความเร็วรอบหัวทวน 3,000 rpm ระยะเวลาคดแซ่ 3 s ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงรอยเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 ความเร็วรอบหัวทวน 2,500 rpm ระยะเวลาคดแซ่ 2 s พบว่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่บริเวณนอกบ่าหัวทวนมีความแข็งแรงสูงสุดและมีแนวโน้มน้อยลงเมื่ออยู่ใกล้บริเวณบ่าหัวทวน (HAZ) ซึ่งบริเวณบ่าหัวทวนจนถึงบริเวณใกล้ปลายหัวทวน นั้นมีความแข็งแรงต่ำกว่า อลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 ของความเร็วรอบ หัวทวน 3,000 rpm ระยะเวลาคดแซ่ 3 s ซึ่งส่งผลให้เกิดการพังทลายรอยเชื่อมบริเวณการทวน (SZ) และเมื่อพิจารณาอลูมิเนียมผสมเกรด AA 1100 ความเร็วรอบหัวทวน 3,000 rpm ระยะเวลาคดแซ่ 3 s พบว่าความแข็งแรงรอยเชื่อมต่ำสุดที่บริเวณ (TMAZ) และมีแนวโน้มน้อยขึ้นเมื่ออยู่นอกบริเวณบ่าหัวทวน





## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนี้ ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงเนื่องจากรอยต่อเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 โดยมีการศึกษาตัวแปรการเชื่อม ที่ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน ระยะเวลาในการกดแช่ ความเร็วในการสอดตัวกวน โดยชิ้นงานที่เป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 มีขนาดความยาว 150 mm ความกว้าง 50 mm ความหนา 1mm มีขนาดความยาว 150 mm กว้าง 50 mm และ ความหนา 1 mm เพื่อหา สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม และให้ได้สมบัติที่ดีที่สุดในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดต่อ ความแข็งแรงดึงแบบกากบาท นอกจากนี้ได้ทำการวัดขนาดความกว้างของบริเวณที่เกิดการเชื่อมยึด เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่ ที่เกิดการเชื่อมและเปรียบเทียบความในสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างมหภาคและ โครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด 6020 N คือ ระยะเวลาตัวกวน 1.4 mm ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลากดแช่ 3 s และอัตราการป้อนตัวกวน 8 mm/min ระยะเวลาปลายตัวกวน ความเร็วรอบและระยะเวลากดแช่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคมีผิวสัมผัสคล้ายตะขอสอง และแสดงการรวมกันอย่างสมบูรณ์ของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดและส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ

5.1.2 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาทที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเป็นลักษณะการพังทลายแบบสัมผัส (Interfacial Fracture) ส่วนลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงแบบกากบาท ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเป็นลักษณะการพังทลายที่โลหะอะลูมิเนียม (Base Metal Fracture) ซึ่งเป็นการพังทลายแบบเหนียว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดของรอยต่อเคาะระหว่าง อะลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 กับ อะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 ปัญหาที่พบจากการดำเนินงาน และการทำการทดลอง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด ระหว่าง อะลูมิเนียมกับอะลูมิเนียม ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงได้สรุปข้อเสนอแนะต่างๆ ดังนี้

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นสิ่งสำคัญ ควรเตรียมชิ้นงานให้ได้ตามขนาดและพิถีพิถันที่กำหนด สามารถใส่เข้ากับอุปกรณ์จับยึดได้อย่างพอดีไม่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อเวลาทำการเชื่อม ตกแต่งครีบบนที่เกิดจากการตัดควรตกแต่งครีบบนให้หมดและตรวจสอบรูปทรงชิ้นงานไม่ให้เกิดการบิดเบี้ยว เพราะอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานเชื่อม ทำให้การเชื่อมไม่สมบูรณ์ ทำความสะอาดชิ้นทดสอบ ควรทำความสะอาดให้ปราศจากสิ่งสกปรกต่างๆ เช่น คาน้ำมัน ฟิล์มเคลือบผิวอะลูมิเนียม เป็นต้น





## เอกสารอ้างอิง

- [1] Sakaguchi,S.(1979). Resistant spot welding of aluminium alloy. J Light Metal Weld Construct, vol. 17, 26-34.
- [2] Y. Su, X. Hua, and Y. Wu.(2014).Quantitative characterization of porosity in Fe–Al dissimilar materials lap joint made by gas metal arc welding with different current modes. Journal of Materials Processing Technology, vol. 214, 81-86.
- [3] Y. Su, X. Hua, and Y. Wu,(2013).Effect of input current modes on intermetallic layer and mechanical property of aluminum–steel lap joint obtained by gas metal arc welding. Materials Science and Engineering: A, vol. 578, pp. 340-345.
- [4] L. Han, M. Thornton, D. Boomer, and M. Shergold, (2010). Effect of aluminium sheet surface conditions on feasibility and quality of resistance spot welding. Journal of Materials Processing Technology, vol. 210,1076-1082,
- [5] C. D. Cox, B. T. Gibson, D. R. DeLapp, A. M. Strauss, and G. E. Cook, (2014).A method for double-sided friction stir spot welding," Journal of Manufacturing Processes, vol. 16, 241-247.
- [6] K. Feng, M. Watanabe, and S. Kumai, (2011) .Microstructure and Joint Strength of Friction Stir Spot Welded 6022 Aluminum Alloy Sheets and Plated Steel Sheets. MATERIALS TRANSACTIONS, vol. 52, 1418-1425.
- [7] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, and B. Zou, (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. Materials & Design, vol. 32, 4461-4470.
- [8] Y. Tozaki, Y. Uematsu, and K. Tokaji, (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47,2230-2236.
- [9] C.-S. Jeon, S.-T. Hong, Y.-J. Kwon, H.-H. Cho, and H. N. Han, (2012). Material properties of friction stir spot welded joints of dissimilar aluminum alloys, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 22, Supplement 3, 605-613.

- [10] Y.-C. Lin, J.-J. Liu, B.-Y. Lin, C.-M. Lin, and H.-L. Tsai,(2012).Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds. *Materials & Design*, vol. 35, 350-357.
- [11] K. N. Solanki, J. B. Jordon, W. Whittington, H. Rao, and C. R. Hubbard, (2012). Structure–property relationships and residual stress quantification of a friction stir spot welded magnesium alloy.*Scripta Materialia*, vol. 66,797-800.
- [12] A. P. Gerlich and T. Shibayanagi, (2009). Grain boundary sliding during friction stir spot welding of an aluminum alloy. *Scripta Materialia*, vol. 60, 236-239.
- [13] T. Rosendo, B. Parra, M. A. D. Tier, A. A. M. da Silva, J. F. dos Santos, T. R. Strohaecker, (2011). Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy. *Materials & Design*, vol. 32,1094-1100,.
- [14] AMS Metals Handbook, (1992). Properties and selection: nonferrous alloy and special-purpose materials. Vol 2
- [15] สุชาติ กิจพิทักษ์, (2541). ทฤษฎีและปฏิบัติงานเชื่อมโลหะเบื้องต้น
- [16] รศ.สมนึก วัฒนศรีกุล, (2549).Material Testing การทดสอบวัสดุ
- [17] ชนะ. กสิภารี, (2528).ความแข็งแรงของวัสดุ
- [18] JIS, (1990). Method of tension test for spot welded joint.
- [19] ASTM E92,(2003). Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.
- [20] ASTM E407,(2007).standard practice for microetching metals and alloys.
- [21] ปรัชญา เพ็ญสุระ, (2550). การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ในการเชื่อมความต้านทาน ชนิดจุด โดยการทดสอบสมบัติทางกลและโลหะวิทยา. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิเวศสีเขียว, vol. 10,16-17,
- [22] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, (2552). การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกลออลูมิเนียมผสม AA 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304.
- [23] ธวัช หมีเฟื่อง กิมะพงษ์ กิมะพงษ์,(2551). อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกลอระหว่างอลูมิเนียม 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 834-839.
- [24] อติสร เปลี่ยนดิษฐ์ กิมะพงษ์ กิมะพงษ์,(2554).อิทธิพลของระยะลึกลงและรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อเชื่อมเสียดทานแบบจุด ระหว่างอลูมิเนียม

ผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304," การประชุมวิชาการหน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 1333-1337.

- [25] Y. F. Sun and H. Fujii,(2013). Microstructure and mechanical properties of dissimilar spot friction stir welded Zr55Cu30Al10Ni5 bulk metallic glass to pure copper Intermetallics, vol. 33,113-119.
- [26] T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, and B. Sazgari, (2010). Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum–copper lap joints made by friction stir welding. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 490, 652-655.
- [27] S. Hirasawa, H. Badarinarayan, K. Okamoto, T. Tomimura, and T. Kawanami (2010) Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210,1455-1463.
- [28] Y. Tozaki, Y. Uematsu, and K. Tokaji, (2010). A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, 844-851.
- [29] A. K. Lakshminarayanan, V. E. Annamalai, and K. Elangovan, Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [30] S. Bozzi, A. L. Helbert-Etter, T. Baudin, B. Criqui, and J. G. Kerbiguet. (2010). Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, 4505-4509.
- [31] P. C. Lin, J. Pan, and T. Pan, (2008). Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool. *International Journal of Fatigue*, vol. 30, 74-89.
- [32] V. X. Tran, J. Pan, and T. Pan,( 2009). Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, 3724-3739.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



# การประชุมวิชาการนานาชาติ ครั้งที่ 11

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน

The 11<sup>th</sup> International KU-KPS Conference

8 - 9 ธันวาคม 2557

“ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน”

บทคัดย่อ  
Abstract





การสร้างเครื่องควบคุมวัตถุบิที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ควบคุมโดยพีแอลซี.....	61
ศักยภาพของมิเตอร์วัดความต้านทานไฟฟ้าของพื้นดินสำหรับการควบคุม	
ในสนามของงานก่อสร้างถนน.....	62
ระบบวัดอุณหภูมิแบบไร้สายสำหรับงานคอนกรีต	
ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา.....	64
การพัฒนาโปรแกรมเรียนรู้เสียงเครื่องดนตรีสำหรับผู้พิการทางสายตา.....	66
การทดลองศึกษารูปแบบของร่องน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่า.....	68
การจำลองคุณภาพน้ำในระบบโครงข่ายท่อประปาของการประปานครหลวง.....	69
การประเมินผลสะพานลอยในการช่วยคนเดินข้ามถนน	
กรณีศึกษา เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร.....	71
การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับผู้ควบคุมงานการก่อสร้างของกรมทรัพยากรน้ำ.....	72
คุณลักษณะการบดอัดและค่ากำลังต้านทาน CBR	
ของดินที่มีกำลังรับน้ำหนักต่ำผสมกับยางรถยนต์ย่อยและเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	73
การพัฒนากระบวนการสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกบ้านจั้นเนื้อศิระชะ	
กรณีศึกษา อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก.....	75
การวางแผนการขนส่งและการผลิตของเกษตรอินทรีย์.....	77
การวิเคราะห์แบบจำลองสถานการณ์ของระบบแถวคอย	
กรณีศึกษาระบบแถวคอยสถานีรถไฟฟ้ายูบีทีเอสโอโคก.....	78
วิธีการค้นหาแบบทาบสำหรับการหาที่ตั้งคลังสินค้าที่พิจารณา	
การควบคุมระดับสินค้าคงคลัง.....	79
การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในการคัดเลือกเครื่องจักร	
กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องประดับ.....	80
การกำหนดการสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับการบริหารวัตถุดิบคงคลัง	
ในโรงงานผลิตชิ้นงานโลหะ.....	81
การใช้หญ้าแฝกร่วมกับแอสฟัลต์อิมัลชันเพื่อพัฒนาอิฐดินดิบ	
ที่ใช้ก่อสร้างในพื้นที่ฝนตกชุก.....	82
ผลกระทบของความเร็วรอบและเวลากดแช่ที่ส่งผลต่อแรงดึงแบบกากบาท	
และโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจตุรรอยต่อเกย	
อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100และอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052.....	84
โครงสร้างจุลภาคและความแข็งชั้นพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน	
JIS-S50C โดยการเชื่อมอาร์กลดอุณหภูมิ.....	85

**ผลกระทบของความเร็วยรอบและเวลากดแช่ที่ส่งผลต่อแรงดึงแบบกากบาทและโครงสร้างจุลภาค  
ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจตุรรอยต่อเกย อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA1100 และ  
อลูมิเนียมผสม แมกนีเซียม AA5052**

**Effect of Rotating Speeds and Holding Time on Cross Tension Force and Microstructure of  
Friction Stir Spot Welded Lap Joint during AA 1100 Aluminum with AA 5052 Aluminum Alloy**

**สุวินัย โสตาเจริญ<sup>1</sup> วิชาภา แก้ววิชิต<sup>2</sup> กิตติพงษ์ กิมะพงศ์<sup>3</sup>  
SuvinaïSodajaroen<sup>1</sup> JesadaKaewwichit<sup>2</sup> Kittipongkimapong<sup>3</sup>**

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของ ตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจตุรรอยต่อแรงดึงแบบกากบาท ของรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA 1100 และ AA 5052 ตัวแปรการเชื่อมในการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วยรอบ 2500 - 3500 รอบ/นาที เวลากดแช่ 2 - 4 วินาที อัตราการกดป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที ผลการทดลองโดยสรุปพบว่าสภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าแรงดึงแบบกากบาทสูงสุดเท่ากับ 4920 นิวตัน คือความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที เวลากดแช่ 3 วินาที การเพิ่มขึ้นความเร็วยรอบและเวลากดแช่ส่งผลทำให้ค่าแรงเพิ่มขึ้น การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยต่อพบว่าความกว้างของผิวสัมผัสคล้ายตะขอมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วยรอบและเวลากดแช่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ผิวสัมผัสคล้ายตะขอ, การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจตุร, ความแข็งแรงรอยต่อ

**Abstract**

This research aims to study an effect of friction stir spot welding on the lap joint cross tension force between AA 1100 aluminum alloy and AA 5052 aluminum alloy. Welding parameters in this experiment consisted of a rotating tool of 2500-3500 rpm, a holding time of 2-4 seconds and a feed rate of 8 mm/min. The summarized results are as follows. The optimum welding condition that gave a maximum cross tension force of 4920 N was the rotating speed of 3500 rpm and the holding time of 3 seconds. Increasing of the rotating speed and the holding time was affected to increase the joint strength. The macrostructure investigation was found that the width of the Hook-like interface was increased with the increasing of the rotating speed and the holding time.

Keywords: Hook-like interface, Friction stirs spot welding, Joint strength

E-mail address: Suvinaï-engineer@hotmail.com

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

<sup>1,2,3</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110



นายวงศ์อนันต์ ณรงค์วัฒนาการ  
นางลัดดา ตรวงศา  
นางমনยา เอกหัตถ์  
นางสุจิตรา ปาจรียานนท์  
นางจินตนา อินทรมงคล  
นายอำพล จุปะมัตถา  
นางนลินี อิมบุญตา

**ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาวิศวกรรมศาสตร์**

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

รองศาสตราจารย์วิชัย กิจวัชรเวทย์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงษ์ภักดิ์ ภัทรประภาพันธ์  
อาจารย์กมล อมรฟ้า  
อาจารย์สิริัญญา ทองชาติ  
อาจารย์นิภาวรรณ กุลสุวรรณ  
อาจารย์ปรีดา ปรากฏมาก  
อาจารย์จිරชัย สุภาสุทธากุล  
อาจารย์คมกฤษณ์ ชัยโย

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพงษ์ เวศพันธุ์

**ภาควิศวกรรมเกษตร**

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

รองศาสตราจารย์ ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล  
รองศาสตราจารย์วิชา หมั่นทำการ  
อาจารย์ ดร.วันรัฐ อับดุลลาฮาซิม  
อาจารย์ ดร.วัชรพล ชยประเสริฐ  
อาจารย์ ดร.อาทิตย์ พวงสมบัติ  
อาจารย์นงลักษณ์ สมนันต์รัฐ  
อาจารย์ศุภชัย กุลมดีวัฒน์  
อาจารย์สิรินาฏ น้อยพิทักษ์

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

รองศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์  
รองศาสตราจารย์สาทิป รัตนภาสกร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรศิษฐ์ ทรุทัศน์วินท์  
อาจารย์ ดร.เพชรรัตน์ ตรีอำนรรค  
อาจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค  
อาจารย์ ดร.เกรียงไกร แซมสีม่วง  
อาจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร  
อาจารย์ ดร.น้กรบ นาคประสม  
อาจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตน์เดช  
อาจารย์ ดร.นฤมล บุญกระจ่าง

#### ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

##### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

รองศาสตราจารย์ ดร.บัญชา ขวัญยืน  
รองศาสตราจารย์ ดร.วรารุช วุฒินิชย์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ไหมเสียดสกุลชัย  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศธร โสภานันท์  
อาจารย์ ดร.สมชาย ดอนเจดีย์  
อาจารย์ ดร.จิระกานต์ ศิริวิชัยโมหิตริ  
อาจารย์ ดร.วิษุวัฒน์ แต่สมบัติ  
อาจารย์ ดร.ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์  
อาจารย์ ดร.สถาพร เต็มพัฒนาพงษ์  
อาจารย์ยุทธนา ตาละลักษมณ

##### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีญา ฤทธิมา  
อาจารย์ ดร.วิษณุ ศรีวงษา  
อาจารย์ ดร.พรรณพิมพ์ พุทธิรักษา มะเปี่ยม  
อาจารย์ ดร.วัชร เลือดดี  
ดร.सानิตย์ดา เตียวตอย

#### ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

##### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสิณี ไสธวิทย์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ ชำของ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขาวี อินทร์ประสิทธิ์  
อาจารย์ ดร.กอบศักดิ์ กาญจนนาพงศกุล

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

อาจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ

อาจารย์ ดร.นฤมล จินดาพรรณ

**ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล**

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

อาจารย์ ดร.ณัฐดนัย ตันทรัพย์วิรุฬห์

อาจารย์ ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศนพ กำเนิดทอง

ดร.ประสาน สถิตเรืองศักดิ์

**ภาควิชาวิศวกรรมโยธา**

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

อาจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ชมหวาน

อาจารย์ ดร.ปนัดดา กลกิจวิวัฒน์

อาจารย์ ดร.สมชาย ประยงค์พันธ์

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.กิตติ ทรัพย์ประสม

อาจารย์ ดร.ทวิช พูลเงิน

อาจารย์ ดร.นที สุริยานนท์

**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์**

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพงษ์ สติระเมธิกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรฤทธิ พุทธิพิพัฒน์ขจร

อาจารย์ ดร.กายรัฐ เจริญราษฎร์

อาจารย์ ดร.ปาริฉัตร เสริมวุฒิสาร

อาจารย์ ดร.ศิวตล เสถียรพัฒน์ากุล

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ชัยศรีเจริญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณณมล เต็มดี

อาจารย์ ดร.กลางใจ สิทธิถาวร

อาจารย์ ดร.วิศว์ บานชื่น

อาจารย์ ดร.โสภณ ผู้มีจรรยา



## มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ขอมอบเกียรติบัตรเพื่อรับรองว่าผลงานวิจัย  
เรื่อง ผลกระทบของความเร็วรอบและเวลาเกิดเชื้อที่ส่งผลกระทบต่อแรงดึงแบบกบกดและโครงสร้างจุดภาคของการเชื่อม  
ด้วยแรงเสียดทานแบบจุดรอยต่อเคย อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052  
โดย

สุวิทย์ โสดาเจริญ เกษฎา แก้ววิชิต และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาวิศวกรรมศาสตร์  
และได้นำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ ๑๑  
ระหว่างวันที่ ๘-๙ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๗

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ชินะวงศ์)  
รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน

(อาจารย์ ดร.อนามย์ คำเนตร)  
ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดสัมมนาวิชาการ  
และประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ครั้งที่ ๑๑

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีสุวินัย โสดาเจริญ
วัน เดือน ปี	29 มีนาคม 2528
ที่อยู่	55/2 ม.5 ต. คณทิ อ.เมือง จ.กำแพงเพชร 62000
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พ.ศ.2551
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัท ซี.พี.เอส.ดีเวลลอปเม้นท์เอ็นจิเนียริง จำกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนรศรีอยุธยา หันตรา
เบอร์โทรศัพท์	08-7061-7442
อีเมลล์	suvinai-engineer@hotmail.com

