

อิทธิพลของรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อม  
เสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม  
SUS304

EFFECT OF TOOL SHOULDER ON FRICTION SPOT JOINING  
JOINT STRENGTH BETWEEN AA1100 ALUMINUM ALLOY AND  
SUS304 STAINLESS

อดิศร เปลียนดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของรูปทรงป่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อ  
การเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100  
และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

อดิศร เปลี่ยนดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

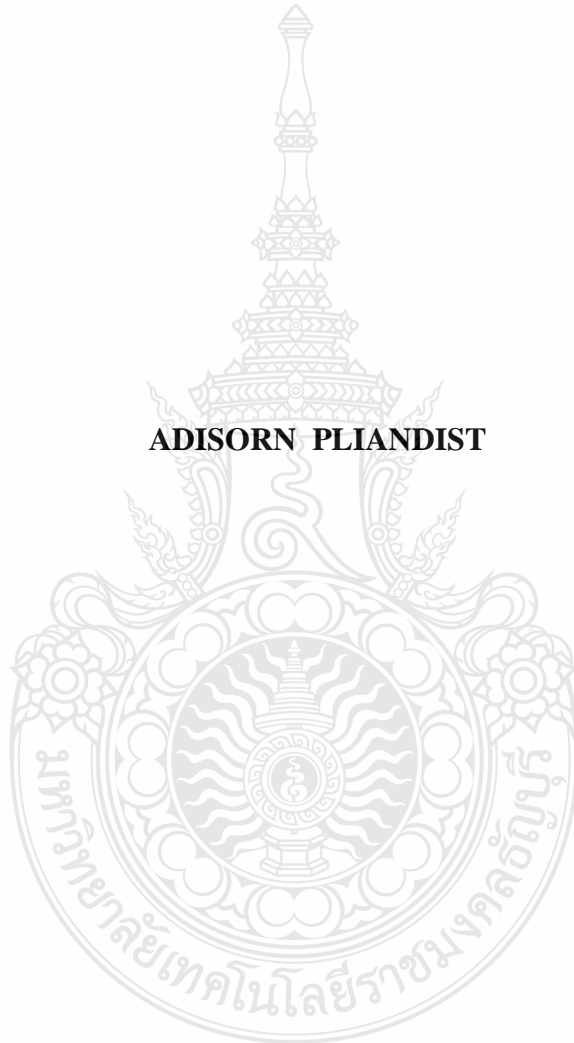
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**EFFECT OF TOOL SHOULDER ON FRICTION SPOT JOINING JOINT  
STRENGTH BETWEEN AA1100 ALUMINUM ALLOY AND SUS304  
STAINLESS STEEL**

**ADISORN PLIANDIST**



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์      อิทธิพลของรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อม  
เสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม  
SUS304  
Effect of Tool Shoulder on Friction Spot Joining Joint Strength between  
AA1100 Aluminum Alloy and SUS304 Stainless Steel

ชื่อ - นามสกุล      นายอดิศร เปลียนดิษฐ์  
สาขาวิชา      วิศวกรรมการผลิต  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.  
ปีการศึกษา      2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ

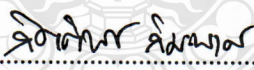
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.)

  
..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี D.Eng.)

  
..... กรรมการ

(อาจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, Ph.D.)

  
..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304
ชื่อ - นามสกุล	นายอดิศร เปลี่ยนดิษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

การควบคุมการรวมตัวของวัสดุไหลตัวรอบผิวสัมผัสรอยต่อการเชื่อมเสียดทานกวนจุดเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้เกิดโลหะเชื่อมคุณภาพสูง การควบคุมนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อรูปร่างเครื่องมือเชื่อมและตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมถูกออกแบบและประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อเกลียวด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างบ่าเครื่องมือเชื่อมเสียดทานกวนจุดที่มีผลต่อแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 วัสดุถูกเตรียมให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว 100 มม. กว้าง 30 มม. และหนา 1 มม. รอยต่อเกลียวเชื่อมเสียดทานกวนจุดด้วยตัวแปรการเชื่อมต่าง ๆ เช่น ทรงบ่าเครื่องมือเชื่อม 5 รูปแบบความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที และอัตราการป้อนเครื่องมือ 4-8 มม./นาที ชิ้นงานเชื่อมที่ได้ถูกนำมาทำการเตรียมและทำการตรวจสอบความแข็งแรงเฉือน ความแข็ง และโครงสร้างโลหะวิทยาของรอยต่อ

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังต่อไปนี้ การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างพื้นที่ผิวบ่าเครื่องมือเชื่อมและโลหะเชื่อม ส่งผลทำให้ความหนาอลูมิเนียมด้านล่างบ่าเครื่องมือที่ผิวสัมผัสรอยต่อเกลียวลดลง และมีผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดอลูมิเนียมออกจากผิวสัมผัสซึ่งจะลดการรวมตัวของโลหะเชื่อมการใช้ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยบ่าเครื่องมือเชื่อมแบบแบนเรียบ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที และอัตราการป้อนเครื่องมือ 8 มม./นาที จะได้รอยต่อที่มีขนาดความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด 2110 นิวตัน และความแข็ง 63 วิกเกอร์สเกล

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานกวนจุด รอยต่อเกลียว บ่าเครื่องมือเชื่อม

<b>Thesis Title</b>	Effect of Tool Shoulder on Friction Spot Joining Joint Strength between AA1100 Aluminum Alloy and SUS304 Stainless Steel
<b>Name – Surname</b>	Mr. Adisorn Pliandist
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2014

## ABSTRACT

The combination control of material flow around the friction stir spot welding (FSSW) lap joint interface was an important factor to produce a perfect joint. This control could be succeeding when proper FSSW tool geometries and welding parameters were designed and applied for producing a joint. Therefore, this research aimed to study the effect of FSSW tool shoulder geometries on tensile shear strength of the AA1100 aluminum alloy and the SUS304 stainless steel lap joint.

The experimental materials used in this research were the AA1100 aluminum alloy and the SUS304 stainless steel with 1 mm in thick. The sample materials were cut into a rectangular shape 100 mm in length and 30 mm in width. The experiment was carry out by using a FSSW process that applied different parameters i.e. 5 types of FSSW tool shoulder, the rotating speed of 2500-4000 rpm and the inserting rate of 4-10 mm/min. The welded specimens were investigated for its tensile strength, hardness and macro-microstructure.

The experimental results can be summarized as follows. Increasing the contact surface between the tool shoulder surface and a weld metal decrease the aluminum thickness at the joint interface. This was resulted in decreasing the metal combination and decreasing the joint strength. The maximum tensile shear strength of 2110 N and hardness of 63 HV were obtained when the flat tool shoulder, the rotating speed of 3000 rpm and the insert rate of 8 mm/min were applied for producing the joint.

**Keywords:** friction stir spot welding, lap joint, tool shoulder geometry

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล คณะกรรมการสอบและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ขอขอบคุณครุวิทยาลัยเทคนิคชัชนาท ครุวิทยาลัยเทคนิคสระบุรี คณาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (สุพรรณบุรี) ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ-คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะวิชาการจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อดิศร เปลี่ยนดิษฐ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วัสดุ.....	5
2.2 กระบวนการเชื่อม.....	13
2.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	14
2.4 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะวิทยา.....	19
2.5 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคปและกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	24
2.6 การตรวจสอบสภาพผิวแตก.....	28
2.7 ลักษณะของสภาพผิวแตก.....	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 การเลือกวัสดุและเตรียมอุปกรณ์การเชื่อม.....	35
3.2 กระบวนการเชื่อม FSJ และตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3 การทดสอบรอยเชื่อม.....	44



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล .....	50
4.1 ผลกระทบของเครื่องมือในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม .....	50
4.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม .....	57
4.3 ผลกระทบของความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม .....	61
4.4 การเปรียบเทียบลักษณะการพังทลาย.....	66
4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....	78
4.6 ผลตรวจสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ...	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก ลักษณะโครงสร้างมหภาคและ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม .....	82
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติทางกล.....	85
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	89
ประวัติผู้เขียน .....	101

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน .....	16
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก .....	22
ตารางที่ 2.3 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็น โลหะนอกกลุ่มเหล็ก .....	23
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม AA1100 .....	36
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 .....	36
ตารางที่ 3.3 สภาพการเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	43
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมบริเวณที่เกิดการพังทลาย .....	74



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กรรมวิธีการเชื่อมแรงเสียดทานแบบจุด .....	2
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเครื่องมือ .....	13
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด .....	14
รูปที่ 2.3 การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวของรอยต่อเกย.....	15
รูปที่ 2.4 ชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน (JIS G 3136).....	16
รูปที่ 2.5 การทดสอบแรงเฉือนตรงหรือแบบสวนทาง .....	17
รูปที่ 2.6 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers.....	18
รูปที่ 2.7 การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค.....	20
รูปที่ 2.8 การขัดผิวชิ้นทดสอบ.....	21
รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคปเพื่อใช้ตรวจสอบสภาพผิวแตกในระดับ มหภาค.....	24
รูปที่ 2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL540LV เพื่อใช้ตรวจสอบสภาพ ผิวแตกในระดับจุลภาค.....	26
รูปที่ 2.11 สัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่ อยู่ในโครงสร้างของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม .....	27
รูปที่ 2.12 ลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบ Cup and Cone .....	29
รูปที่ 2.13 สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ .....	30
รูปที่ 2.14 ลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบ Dimple เมื่อได้รับการกระทบแบบ Overload และ แรงเฉือน.....	30
รูปที่ 2.15 ลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบเปราะ .....	31
รูปที่ 2.16 ผิวแตกของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม จากการตรวจสอบในระดับมหภาค.....	32
รูปที่ 2.17 ภาพถ่าย SEM ตรงบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยแตกซึ่งแสดงถึง Ratchet Marks ที่ชัดเจนขึ้น .....	33
รูปที่ 2.18 ภาพถ่าย SEM ในช่วงของBeach Marks พบ Striations Lines (ลูกศร) ที่มีขนาดเล็กเป็น จำนวนมาก .....	33
รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM ตรงบริเวณสุดท้ายของรอยแตกแสดงลักษณะผิวแตกเป็นแบบ Dimple	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 อลูมิเนียม AA1100.....	35
รูปที่ 3.2 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 .....	36
รูปที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงาน .....	37
รูปที่ 3.4 รูปแบบของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบต่อเกลย .....	37
รูปที่ 3.5 เครื่องมือเชื่อม T1 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะแบนเรียบ .....	38
รูปที่ 3.6 เครื่องมือเชื่อม T2 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะเอียงออก .....	39
รูปที่ 3.7 เครื่องมือเชื่อม T3 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะเอียงเข้าด้านใน .....	39
รูปที่ 3.8 เครื่องมือเชื่อม T4 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะนูนออก .....	40
รูปที่ 3.9 เครื่องมือเชื่อม T5 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะ โคนเว้าเข้า .....	40
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์จับยึดแผ่นบน .....	41
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์จับยึดแผ่นล่าง .....	41
รูปที่ 3.12 เครื่องกัดอัตโนมัติ EumachLMC-1000 .....	42
รูปที่ 3.13 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดแบบรอยต่อเกลย (LAP JOINT) .....	43
รูปที่ 3.14 การเชื่อมอลูมิเนียมผสม AA1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 แบบรอยต่อเกลย .....	44
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานเชื่อม.....	44
รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงดึง .....	45
รูปที่ 3.17 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานเชื่อมหลังทดสอบแรงดึง .....	45
รูปที่ 3.18 เครื่องตัดเตรียมชิ้นงาน .....	46
รูปที่ 3.19 เรือน (Mounting) หุ้มชิ้นงาน .....	46
รูปที่ 3.20 เครื่องอัดเบเกไลท์ (Bakelite) .....	47
รูปที่ 3.21 เครื่องขั้วคูโครงสร้าง .....	47
รูปที่ 3.22 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope) .....	48
รูปที่ 3.23 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป แบบส่องกราด .....	48
รูปที่ 3.24 ตำแหน่งการกดทดสอบความแข็ง .....	49
รูปที่ 3.25 ตำแหน่งการกดทดสอบความแข็ง .....	49

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ลักษณะของรอยเชื่อมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วย ก. เครื่องมือเชื่อม T1 ข. เครื่องมือเชื่อม T2 ค. เครื่องมือเชื่อม T3 ง. เครื่องมือเชื่อม T4 จ. เครื่องมือเชื่อม T5.....	51
รูปที่ 4.2 ความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด (Tensile Shear Strength ) ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือเชื่อม T1-T5.....	52
รูปที่ 4.3 ลักษณะของการพังทลายของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยก.เครื่องมือเชื่อมT1ข.เครื่องมือเชื่อม T2 ค. เครื่องมือเชื่อมT3 ง. เครื่องมือเชื่อมT4 จ. เครื่องมือเชื่อมT5 .....	53
รูปที่ 4.4 ระยะเวลาการพังทลายของรอยเชื่อมด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมของเครื่องมือ T1-T5.....	54
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค ความแข็งและการวัดความสูงของอลูมิเนียม ที่ด้านล่างของบ่าเครื่องมือ ( $t_{\mu}$ ) .....	55
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของ Hardness กับ Feeds และ Effective Thickness ( $t_{\mu}$ ) ของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือ T1-T5 .....	56
รูปที่ 4.7 ลักษณะของรอยเชื่อมที่เชื่อมความเร็วรอบ 2500 3000 3500 และ 4000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือเชื่อม T1 .....	57
รูปที่ 4.8 ความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด (Tensile Shear Strength ) ของรอยเชื่อมที่ความเร็วป้อน 8 มม./นาที เครื่องมือเชื่อม T1 ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500-4000 รอบต่อนาที.....	58
รูปที่ 4.9 ลักษณะของการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือ T1.....	59
รูปที่ 4.10 ระยะเวลาการพังทลายของรอยเชื่อมด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมของเครื่องมือ T1 ของรอย เชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 3000 3500 และ 4000 รอบ/นาทีความเร็วป้อน 8 มม./นาที	60
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งกับความหนา ( $t_{\mu}$ ) ของรอยเชื่อมที่ ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือ T1 ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที .....	60
รูปที่ 4.12 ลักษณะของรอยเชื่อมที่เชื่อมความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที ของเครื่องมือ T1.....	62
รูปที่ 4.13 ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อมT1 ความเร็วรอบในการ เชื่อม 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที .....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 ลักษณะของการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที ของเครื่องมือ T1.....	63
รูปที่ 4.15 ระยะเวลาการพังทลายของรอยเชื่อมด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมของเครื่องมือ T1 ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4 6 8 10 มม./นาที.....	64
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของ Hardness กับ Feeds และ Effective Thickness ( $t_e$ ) ของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือ T1 ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4-10 มม./นาที ....	65
รูปที่ 4.17 รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง ก. การพังทลายของรอยเชื่อม ข. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย ค. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1 ง. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 2 .....	66
รูปที่ 4.18 รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ ก. การพังทลายของรอยเชื่อม ข. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย ค. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1 ง. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 2 .....	67
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ ก. 3000 รอบ/นาที ข. 4000 รอบ/นาที..	78
รูปที่ 4.20 ตำแหน่งการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ด้วย EDS-Mapping และ EDS-Linescan	69
รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมในตำแหน่งวิเคราะห์ EDS-Mapping ของรอยเชื่อม ก. รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง ข. รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ.....	69
รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย EDS-Mapping ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง.....	70
รูปที่ 4.23 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย EDS-Mapping ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง.....	71
รูปที่ 4.24 ลักษณะของรอยเชื่อมในตำแหน่งวิเคราะห์ EDS-Linescan ของรอยเชื่อม ก. รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง ข. รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ .....	72
รูปที่ 4.25 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ด้วย EDS-Linescan ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง.....	72
รูปที่ 4.26 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ด้วย EDS-Mapping ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง.....	73

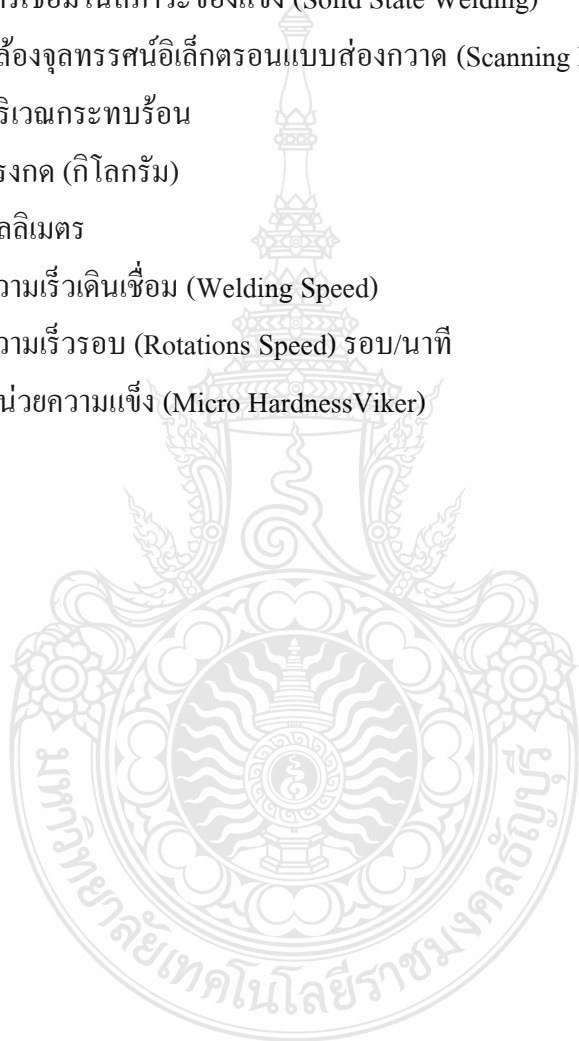
## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 กราฟการกระจายตัวความเข้มข้นของธาตุของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง.....	74
รูปที่ 4.28 กราฟการกระจายตัวความเข้มข้นของธาตุของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ.....	75
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบปริมาณการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของชิ้นงานเชื่อม.....	75



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AA	สมาคมอะลูมิเนียม (Aluminum Association)
FSSW	การเชื่อมเสียดทานกวนจุด (Friction Stir Spot Welding)
RSW	การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding)
SSW	การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
TMAZ	บริเวณกระทบร้อน
kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
mm	มิลลิเมตร
mm/min	ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed)
rpm	ความเร็วรอบ (Rotations Speed) รอบ/นาที
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)





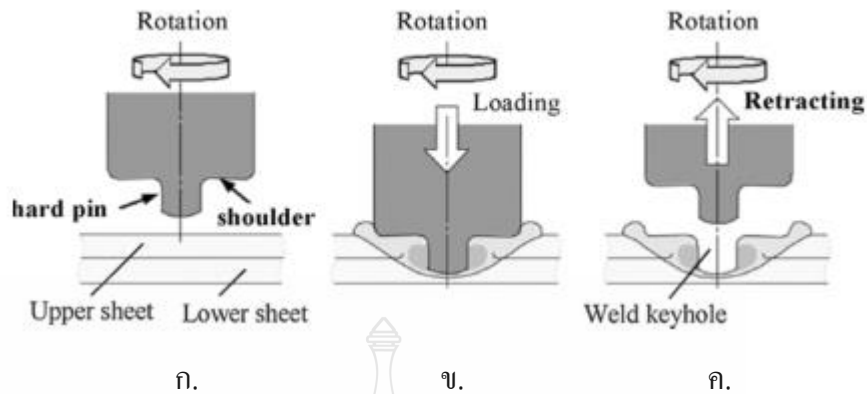
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining: FSJ) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยกลุ่มบริษัทมาสด้า (Mazda Motor Cooperation) [1] และบริษัทอุตสาหกรรมหนักคาวาซากิ (Kawazaki Heavy Industry) [2] เพื่อใช้ในการเชื่อมวัสดุแผ่นบางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของประเทศญี่ปุ่น โดยมีจุดประสงค์หลักในการลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานประกอบรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น โดยนำเอาวิธีการเชื่อมนี้เข้าไปทดแทนการเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) หลักการอย่างง่ายในการทำให้เกิดรอยต่อของโลหะแผ่นบางแสดงในรูปที่ 1 ชิ้นงานที่เป็นลักษณะของรอยต่อถูกวางยึดแน่นอยู่บนพื้นระนาบดังแสดงในรูปที่ 1ก. จากนั้นเครื่องมือเชื่อมที่เป็นรูปทรงกระบอกที่มีตัวกวนรูปทรงกระบอกขนาดเล็กติดอยู่ที่ส่วนปลายถูกทำให้หมุนด้วยความเร็วสูงที่กำหนดแล้วกดตัวกวนลงไปในรอยต่อด้วยความเร็ว แรงกด และระยะความลึกที่กำหนดจนกระทั่งบ่าของเครื่องมือจุ่มลงไปบนผิวโลหะด้านบนของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 1ข. จากนั้นตัวกวนจะถูกกดแช่ที่ตำแหน่งนั้นตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วถอนตัวขึ้นจากรอยต่อ จะได้รอยต่อที่เกิดการประสานกันของโลหะ 2 แผ่นดังแสดงในรูปที่ 1ค. จากหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดรอยต่อในสถานะของแข็งที่โลหะบริเวณรอยต่อไม่ก่อให้เกิดการหลอมละลายของโลหะจึงมีเหตุผลเป็นไปได้ว่า การเชื่อมเสียดทานแบบจุดนี้สามารถใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายอื่นๆ เช่น การเชื่อมอาร์กก็๊วชปกคลุมหรือการเชื่อม MIG/MAG ได้ เพราะการเชื่อมที่กระทำภายใต้จุดหลอมเหลวของวัสดุมักไม่ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะ หรือข้อบกพร่องอื่นๆ ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลงได้ ดังเช่นการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงที่ยอมรับได้ [3]

รอยต่อวัสดุต่างชนิดที่ได้รับความสนใจในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันมีหลายชนิด หนึ่งในนั้นคือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งในการนำมาใช้งานนั้น ผู้คิดค้นมีจุดประสงค์เพื่อทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างรถยนต์ลดลง ทำให้เครื่องยนต์ใช้งานได้ดีมีประสิทธิภาพ ประหยัดการใช้น้ำมัน และส่งผลทางอ้อมต่อการรักษาสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1.1 กรรมวิธีการเชื่อมแรงเสียดทานแบบจุด [1]

ที่ผ่านมา มีการรายงานผลการทดลองการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กที่น่าสนใจ คือ Fujimoto et al. [1] ได้รายงานการเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมเกรด 6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อ มีค่าใกล้เคียงกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด นอกจากนี้ Tanaka and Kumagai [2] ได้เชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อเกยอลูมิเนียมเกรด 6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะของปลายของตัวกวนที่สอดเข้าไปในรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียม และความเร็วรอบของตัวกวน พบว่ารอยต่อมีความแข็งแรงสูงสุด มีสารประกอบกึ่งโลหะก่อตัวขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงเนื่องจากรอยร้าว (Fracture Path) ของรอยต่อไม่ได้เกิดขึ้นผ่านแนวนี้ Lin et al. [4, 5] แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบการร้าวของแนวเชื่อม ที่เกิดจากการเชื่อมโดยเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงบ่าแบนและรูปทรงบ่าเอียง กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [6] ได้ประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่ออลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยทำการศึกษาตัวแปรประกอบไปด้วย ความเร็วรอบ ความเร็วป้อน เวลากดแช่ และรายงานความแข็งแรงของรอยต่อที่มีค่าสูงกว่าอลูมิเนียมหลักที่ใช้ในการทดลอง

อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรการเชื่อมอื่นๆ ของ การเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่ออลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ไม่ได้มีการรายงานไว้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ FSJ ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมเพิ่มเติมที่ประกอบด้วย รูปร่างของบ่าเครื่องมือเชื่อม ความเร็วรอบ ความเร็วป้อนที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกย เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงสุดที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกลียวการเชื่อมเสียดทานกวนจุด

1.2.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาครอยต่อเกลียวที่เชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของรอยต่อเกลียว

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานกวนจุด (Friction Spot Joining) ในการเชื่อมรอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 ความหนา 1 มม. และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ความหนา 1 มม.

1.3.2 การเชื่อมกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ด้านล่าง โดยใช้เครื่องกัดแบบอัตโนมัติในการเชื่อม

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานกวนจุด ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 อันประกอบด้วย

1.3.3.1 ลักษณะรูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม 5 รูปแบบ

1.3.3.2 ความเร็วรอบตัวกวนที่ 2500 3000 3500 และ 4000 รอบ/นาที

1.3.3.3 อัตราป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ด้วยการทดสอบแรงดึงเนื้องาน การทดสอบความแข็งและวัดขนาดรอยเชื่อมหลังทดสอบแรงดึง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่ที่เกิดการเชื่อมยึด

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

1.3.6 ศึกษาการพังทลายของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

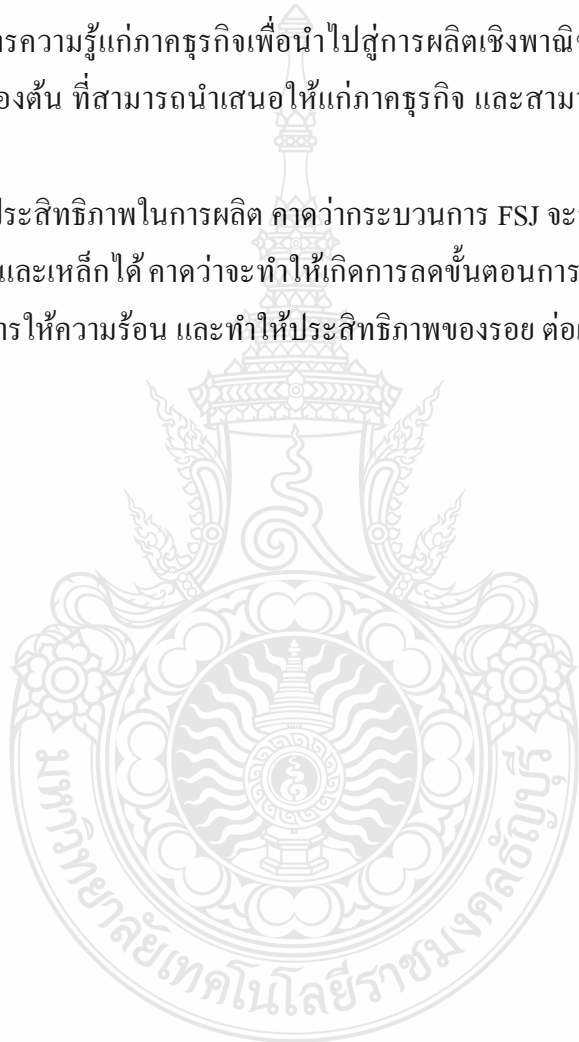
1.4.1 แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการศึกษาเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการ FSJ ในการประสานรอยต่อชนของวัสดุต่างชนิดของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.4.2 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป พัฒนาองค์ความรู้พื้นฐานของ FSJ สำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด เช่น อลูมิเนียมและเหล็กกล้า เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ

1.4.3 บริการความรู้แก่ประชาชน พัฒนากระบวนการเชื่อมทางเลือกในการต่อวัสดุต่างชนิดให้แก่กลุ่มคนที่ต้องการทราบกระบวนการเชื่อมชนิดที่สามารถทำการเชื่อมวัสดุที่ใช้พลังงานในการเชื่อมน้อยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.4.4 บริการความรู้แก่ภาครัฐกิจเพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ จัดเตรียมข้อมูล วิธีการ และผลการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาครัฐกิจ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการผลิตได้ทันที

1.4.5 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต คาดว่ากระบวนการ FSJ จะสามารถทำการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กได้ คาดว่าจะทำให้เกิดการลดขั้นตอนการเชื่อมลง นอกจากนั้นทำให้ประหยัดพลังงานในการให้ความร้อน และทำให้ประสิทธิภาพของรอย ต่อเพิ่มขึ้นและแข็งแรงขึ้น



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุ

##### 2.1.1 อลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและการออกแบบซึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับเหล็กกล้า อลูมิเนียมจะมีความหนาแน่น (Density) ประมาณ 2770 กก./ม.<sup>3</sup> ขณะที่เหล็กมีความหนาแน่นประมาณ 7750 กก./ม.<sup>3</sup> อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความเค้นประมาณ 90 เมกะปาสคาล ค่าความเค้นนี้สามารถปรับปรุงให้มีค่าสูงขึ้นได้โดยการทำ Cold Working และผสมด้วยธาตุอื่น ๆ ลงไป ค่า Modulus of Elasticity, E ของอลูมิเนียมเท่ากับ 71 จิกะปาสคาล ซึ่งมีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของเหล็กกล้า มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางแทนเหล็กกล้า และทองแดงได้ในหลาย ๆ ด้านของงานวิศวกรรม และอุตสาหกรรมอลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถหล่อหลอมได้ง่าย ข้อเสียของอลูมิเนียมมีอยู่บ้างเหมือนกัน โดยเฉพาะอลูมิเนียมมีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก [7, 8]

##### 2.1.1.1 การนำไปใช้งาน [9]

ขึ้นอยู่กับธาตุประกอบอัลลอยด์ และการอบร้อน เกรดอลูมิเนียม สามารถแสดงคุณสมบัติได้หลากหลาย จากรูปลักษณ์ที่สวยงาม, ความสะดวกในการผลิต, ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี, อัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง, เชื่อมได้ดี และค่าความต้านทานการแตกหักสูง เลือกเกรดอลูมิเนียมที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของงาน และสภาวะการใช้งาน

##### 1) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 1xxx

เกรดของอลูมิเนียมประเภทนี้มีเหล็ก และซิลิคอนเป็นธาตุหลัก (1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350, อื่นๆ) ซึ่งเป็นประเภทที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี, สภาพการนำความร้อน และนำไฟฟ้าสูง, คุณสมบัติทางกลต่ำ และใช้งานได้ดี สามารถเพิ่มความแข็งแรงระดับปานกลางได้โดยอาจได้รับจากกระบวนการเพิ่มความเครียด

##### 2) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 2xxx

เกรดของอลูมิเนียมประเภทนี้ (2011, 2014, 2017, 2018, 2124, 2219, 2319, 201.0; 203.0; 206.0; 224.0; 242.0; อื่นๆ) ต้องการกระบวนการอบร้อนเพื่อให้ได้คุณสมบัติ

สูงสุดในสภาวะกระบวนการอบร้อนนี้ ค่าคุณสมบัติทางกลจะคล้ายกัน หรือบางที่อาจสูงกว่าในบรรดาเหล็กคาร์บอนต่ำ และในบางชนิดการทำกระบวนการอบร้อนซ้ำ จะทำให้สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลได้ การอบร้อนนี้จะเพิ่มค่าจลจลคราก แต่จะทำให้เสียสภาพการยึดตัว ซึ่งจะทำให้ค่าต้านทานแรงดึงไม่ดี

อลูมิเนียมอัลลอยด์ประเภท 2xxx ไม่ใช่ตัวต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเหมือนกับอลูมิเนียมอัลลอยด์ประเภทอื่น และภายใต้สภาวะการกัดกร่อนแบบบางๆ อาจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ เกรดอลูมิเนียมประเภท 2xxx จะมีประโยชน์ต่อส่วนที่ต้องการความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงสุด 150 องศาเซลเซียส (300 องศาฟาเรนไฮต์) แต่ยกเว้นเกรด 2219 อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรดนี้มีขีดจำกัดในการเชื่อม แต่อัลลอยด์บางชนิดในประเภทนี้จะมีรูปแบบการแปรรูปที่ดีเยี่ยม ส่วนอลูมิเนียมเกรด 2021 เป็นเกรดที่ได้รับความนิยมสูงสุดในการใช้ผลิตอากาศยาน

### 3) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 3xxx

เกรดของอลูมิเนียมประเภทนี้ (3003, 3004, 3105, 383.0; 385.0; A360; 390.0) โดยปกติแล้วจะไม่สามารถใช้การอบร้อนได้ แต่มีค่าความแข็งแรงมากกว่าประเภท 1xxx อยู่ 20 % เพราะว่า ข้อจำกัดของปริมาณแมกนีเซียม (สูงสุดที่ 1.5 %) ที่สามารถเพิ่มเข้าไปในอลูมิเนียมได้ ซึ่งแมกนีเซียมจะถูกใช้เป็นธาตุหลักในอัลลอยด์บางชนิดเท่านั้น

### 4) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 4xxx

เกรดของอลูมิเนียมประเภทนี้ (4032, 4043, 4145, 4643, อื่น ๆ) มีซิลิกอนเป็นธาตุหลัก ซึ่งสามารถเพิ่มได้ในปริมาณที่เพียงพอ (สูงสุด 12 %) ที่จะทำให้เกิดการลดช่วงการหลอมเหลว ด้วยเหตุนี้ อลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยด์จึงถูกใช้ทำเป็นลวดเชื่อม และใช้ในการเชื่อมประสานอลูมิเนียม ในช่วงการหลอมเหลวต่ำ แทนการใช้โลหะ อลูมิเนียมอัลลอยด์ที่บรรจุซิลิกอนมากพอจะทำให้เห็นเป็นสีเทาดำเหมือนถ่าน เมื่อเสร็จสิ้นการออกซิไดซ์ (Anodic Oxide) จะถูกนำไปใช้ และด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่ต้องการสำหรับการใช้งานด้านสถาปัตยกรรม

### 5) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 5xxx

ธาตุหลักของอัลลอยด์ประเภทนี้คือ แมกนีเซียม เมื่อถูกใช้เป็นธาตุหลัก หรือใช้ร่วมกับแมงกานีส จะทำให้มีค่าความแข็งแรงปานกลาง และสามารถทำการชุบแข็งได้ แมกนีเซียมจะส่งผลมากกว่าแมงกานีสในเรื่องของความแข็ง (แมกนีเซียม 0.8 % เท่ากับ แมงกานีส 1.25 %) และยังสามารถเพิ่มได้ในปริมาณมากอีกด้วย อลูมิเนียมอัลลอยด์ในประเภทนี้ (5005, 5052, 5083, 5086, อื่นๆ) ใช้ในงานเชื่อมได้ดี และต้านทานการกัดกร่อนจากน้ำได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการผลิตจะจำกัดอยู่ที่การขึ้นรูปเย็น และใช้อุณหภูมิในการดำเนินงานที่ 150 องศาฟาเรนไฮต์ สำหรับ

แมกนีเซียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ เพื่อหลีกเลี่ยงความอ่อนแอที่เกิดจากการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress-Corrosion Cracking)

#### 6) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 6xxx

อลูมิเนียมอัลลอยด์ในประเภท 6xxx คือ (6061, 6063) ประกอบไปด้วยซิลิคอน และแมกนีเซียม ในปริมาณที่มากพอในการขึ้นรูป Magnesium Silicide ( $Mg_2Si$ ) ซึ่งทำให้สามารถทำกระบวนการอบร้อนได้ แต่ก็มี ความแข็งแรงไม่เท่ากับประเภท 2xxx และ 7xxx โดยประเภท 6xxx นี้จะสามารถทำการขึ้นรูปได้ดี, เชื่อมง่าย, แปรรูปง่าย และต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ด้วยความแข็งแรงปานกลาง เกรดอลูมิเนียมในประเภทที่สามารถทำการ Heat-Treatable ได้ อาจจะขึ้นรูปในแบบ T4 Temper (แก้ปัญหาคือการอบร้อนได้ แต่ไม่สามารถเร่งการอบร้อนได้) และเพิ่มความแข็งแรงหลังจากการขึ้นรูปแบบคุณสมบัติ T6 โดยการเร่งการอบร้อน

#### 7) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 7xxx

อลูมิเนียมผสมสังกะสีประมาณ 1 ถึง 8 % เป็นธาตุหลักในประเภท 7xxx อลูมิเนียมอัลลอยด์ (7075, 7050, 7049, 710.0, 711.0, อื่นๆ) และเมื่อทำการรวมกับแมกนีเซียมในปริมาณเล็กน้อย ผลที่ได้คือจะมีค่าความแข็งแรง ตั้งแต่ระดับปานกลางจนถึงสูงมาก ส่วนธาตุอื่น ๆ เช่น ทองแดง และ โครเมียม ก็ถูกเพิ่มเข้าไปในปริมาณเล็กน้อยเหมือนกัน อัลลอยด์ประเภท 7xxx ถูกใช้ทำเป็นโครงสร้างลำตัวของอุปกรณ์มือถือ และชิ้นส่วนที่มีความเค้นสูง อลูมิเนียมอัลลอยด์ความแข็งแรงสูง 7xxx จะแสดงการลดความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress-Corrosion Cracking) และถูกใช้ในอบคืนไฟ (Temper) ที่มีอายุกินมาเล็กน้อย เพื่อให้ได้การรวมกันของความแข็งแรง, ความต้านทานการกัดกร่อน และค่าความต้านทานการแตกหัก

#### 8) เกรดอลูมิเนียม ประเภท 8xxx

ประเภท 8xxx (8006; 8111; 8079; 850.0; 851.0; 852.0) สงวนไว้สำหรับการผสมกับธาตุอื่นๆ นอกเหนือจากที่ใช้สำหรับประเภท 2xxx ถึง 7xxx เหล็ก และนิกเกิลถูกใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยไม่มีการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้า และถูกใช้อย่างแพร่หลาย เช่น อัลลอยด์ตัวนำ 8017 อลูมินัม-ลิเทียม อัลลอยด์ 8090 มีความแข็งแรง และความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษ เพราะถูกพัฒนาให้ใช้กับงานอากาศยาน และอลูมิเนียมอัลลอยด์ในประเภท 8000 สอดคล้องกับของระบบ Unified Numbering A98xxx

### 2.1.1.2 คุณสมบัติของอลูมิเนียม [10]

#### 1) คุณสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียม (Chemical Properties)

- (1) ออกซิเจน เมื่อออกซิเจนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะทำให้เกิดชั้นฟิล์ม บางๆเรียก ว่าออกซิเดชันออกไซด์ อยู่ที่ชั้นผิวของ ออกซิเดชัน ซึ่งจะทำให้ไม่เกิด ปฏิกิริยาต่อไป
  - (2) ไนโตรเจน เมื่อออกซิเดชันทำปฏิกิริยา กับไนโตรเจน จะทำให้เกิดไนไตรด์ที่อุณหภูมิสูง
  - (3) กำมะถัน เมื่อออกซิเดชันทำปฏิกิริยา กับกำมะถัน จะไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น
  - (4) ไฮโดรเจน เมื่อออกซิเดชันทำปฏิกิริยา กับไฮโดรเจน ละลายแทรกซึมเข้าไปในออกซิเดชันได้และใน การหล่อออกซิเดชันถือ ว่าไฮโดรเจนเป็นก๊าซ ที่จะต้องกำจัดออก ให้หมดมากที่สุด
  - (5) กรดอินทรีย์ (เข้มข้น) เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ กรดอินทรีย์ ซึ่งออกซิเดชันสามารถ ทนได้บ้าง
  - (6) กรดอินทรีย์ (เจือจาง) เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ กรดอินทรีย์เจือจาง ซึ่งจะทำให้เกิด ปฏิกิริยา ทันที
  - (7) ค่าง เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับค่าง ซึ่งสามารถ ละลายออกซิเดชันได้
  - (8) เกลือ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับเกลือ ซึ่งสามารถ กัดกร่อนออกซิเดชันได้
  - (9) กรดอินทรีย์ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับกรดอินทรีย์ ซึ่งสามารถละลาย ในออกซิเดชันได้ทันที (ยกเว้นกรดน้ำส้ม)
  - (10) กรดอินทรีย์ + น้ำ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับกรดอินทรีย์ + น้ำ ซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเดชัน
  - (11) ฮาโลเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับฮาโลเจน ซึ่งทำให้เกิด ปฏิกิริยาทันที
- 2) คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)
    - (1) การต้านทานไฟฟ้าที่ 20 องศาเซลเซียส 2.6548 โอห์ม-ซม.
    - (2) การนำไฟฟ้า 94.94 % IACS
  - 3) คุณสมบัติฟิสิกส์ (Physical Properties)
    - (1) หมายเลขอะตอม 13
    - (2) น้ำหนักอะตอม 26.97
    - (3) วาเลนซ์ 3
    - (4) โครงสร้างผลึก FCC
    - (5) มิตติของแลตทิซ 40.49 อังสตรอม



- (6) ความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส 2.6989 กรัม/มม.<sup>3</sup>
- (7) จุดหลอมเหลว 660.2 องศาเซลเซียส
- (8) จุดเดือด 2450 องศาเซลเซียส
- (9) การหดขณะแข็งตัว 6.6 %
- (10) ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย 94.5 แคลอรี/กรัม
- (11) ความร้อนแฝงของการเป็นไอ 2260 แคลอรี/กรัม
- (12) ความร้อนจำเพาะที่ 100 องศาเซลเซียส 0.224 แคลอรี/กรัม
- (13) การนำความร้อนที่ 20 องศาเซลเซียส 0.57 แคลอรี/กรัม
- (14) การสะท้อนแสง
- (15) แสงจากหลอดทั้งสแตน 90 %
- (16) แสง 2000-2500 อังสตรอม 86-87 %
- (17) แสง 10000 อังสตรอม 96 %
- (18) สี ขาวเงิน

#### 2.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม หมายถึง เหล็กที่มีส่วนผสมของโครเมียมไม่น้อยกว่า 12 % โดยน้ำหนัก และนิเกิลประมาณ 8 % โดยน้ำหนักในเหล็กที่มีโครเมียมผสมอยู่ปริมาณสูง ๆ จะทำให้เหล็กมีความสามารถต้านทานต่อการเกิดสนิมได้มากขึ้นจนกระทั่งไม่เกิดเลย ถึงแม้ว่าเหล็กนั้นจะอยู่ในน้ำหรือสารละลายที่เป็นกรดเจือจาง ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมเมื่อรวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดโครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) เป็นแผ่นบางๆ เกาะติดแน่นที่ผิวเหล็ก ทำหน้าที่เสมือนเกราะป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนจากภายนอกเคลื่อนผ่าน หรือผ่านได้น้อยลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้ยากการผุกร่อนจึงไม่เกิดที่ผิวเหล็กซึ่งเรียกว่า “พาสซีวิตี” (Passivity) ซึ่งพบว่าเมื่อผสมโครเมียมในเหล็กมากกว่า 12% จะทำให้เหล็กมีสมบัติไม่เกิดการผุกร่อนที่ผิว จึงทำให้ผิวเหล็กไม่เปลี่ยนสีน้ำตาลหรือสีดำเหมือนเหล็กทั่วไป ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมจึงเหมาะกับการใช้งานทั้งด้านทานการผุกร่อน และทนความร้อน [11]

##### 2.1.2.1 การจำแนกชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มพื้นฐาน ได้ 5 กลุ่มคือ ออสเทนนิติก, เฟอริติก, ดูเพล็กซ์, มาร์เทนซิติก และ กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยวิธีการตกผลึก [12]

1) กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) หรือเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูล 300 เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึง 70 % มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (Non-Magnetic) มี

ส่วนผสมของโครเมียม 16 % คาร์บอนอย่างมากที่สุด 0.15 % มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิล 8% เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการทำการประกอบ (Fabrication) และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและนิยมเรียก 18/10 คือการที่มีส่วนผสมของโครเมียม 18 % และนิกเกิล 10 %

2) กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic) แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) มีธาตุคาร์บอนผสมปริมาณที่ต่ำ และมีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่สำคัญ อาจอยู่ระหว่าง 10.5%-27% และมีนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อยมากหรือไม่มีเลย

3) กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic) แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 12-14 % และมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมอยู่ประมาณ 0.2-1 % ไม่มีนิกเกิล สเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูลนี้สามารถปรับความแข็งได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering) สามารถลดความแข็งได้ คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน และพบการใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด, อุตสาหกรรมเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป

4) กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation Hardening) เกรดที่เป็นที่รู้จักในตระกูลนี้ คือ 17-4H ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 17 % และนิกเกิล 4 % สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกลไกเพิ่มความแข็งจากการตกผลึก (Precipitation Hardening Mechanism) โดยสามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1000-1500 เมกะปาสกาล (MPa) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat Treatment)

5) กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้างเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก มีโครเมียมเป็นธาตุผสมอยู่ระหว่าง 19-28 % และ โมลิบดีนัมสูงกว่า 5 % และมีนิกเกิลน้อยกว่าตระกูลออสเทนนิติก พบว่ามีการใช้งานมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบรรยากาศแวดล้อมของคลอไรด์

#### 2.1.2.2 การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ (Austenitic Stainless Steels) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดที่มีโครงสร้างพื้นฐานออสเทนไนต์ ที่มีธาตุผสม 3 ธาตุคือเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล ทั่วๆ ไปจะมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ 16-25 %, นิกเกิล 7-20 % แบ่งตามระบบตัวเลขได้แก่ AISI 3xx และบางครั้งอาจผสมแมงกานีสอีกเล็กน้อย ตามระบบตัวเลขได้แก่กลุ่ม AISI 2xx เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้แบ่งตามปริมาณส่วนผสมของธาตุผสมได้หลายชนิดและมีชื่อเรียกแตกต่างกันคือ

1) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ธรรมดา มีปริมาณโครเมียม 18 %, นิกเกิล 8. % ทางการค้าจึงเรียกเหล็กชนิดนี้ว่า “เหล็กกล้าไร้สนิม 18/8” มีคุณสมบัติในด้านความแข็งแรง

และความเหนียวสูง อีกทั้งทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เป็นประเภทที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและรู้จักกันมากที่สุด

2) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ดิกผสมโมลิบดีนัม มีปริมาณโครเมียม 18-20 %, นิกเกิล 8-14 %, โมลิบดีนัม 2-3 % และคาร์บอน 0.10 % (อาจผสมไทเทเนียมหรือนิโอบีียมสำหรับใช้ในงานเชื่อมโดยเฉพาะ) มีชื่อเรียกทางการค้าว่า “เหล็กกล้าไร้สนิม 18/8-Mo” มีสมบัติทางด้านทนการกัดกร่อนสูง

3) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ดิกทนการกัดกร่อน มีปริมาณโครเมียม 20-25 %, นิกเกิล 25-30 %, โมลิบดีนัม 4-5 %, ทองแดง 1.5-4 % และคาร์บอน 0.10 % มีสมบัติทางด้านการกัดกร่อนสูงมากเหมาะสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมเคมี

4) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ดิกความเหนียวสูง มีปริมาณโครเมียม 12 %, นิกเกิล 12 % มีชื่อเรียกทางการค้าว่า “เหล็กกล้าไร้สนิม 12/12” หรือปริมาณโครเมียม 18 %, นิกเกิล 12 % ชื่อเรียกทางการค้าว่า “เหล็กกล้าไร้สนิม 18/12” มีสมบัติทางด้านความเหนียวสูงเหมาะสำหรับงานขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เช่น ทำอ่างล้างจาน ภาชนะต่างๆ

#### 2.1.2.3 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม [13]

##### 1) คุณสมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ค่าที่แสดงในตารางที่ 1 เป็นเพียงค่าประมาณ เนื่องจากการเปรียบเทียบทำได้ยาก ค่าความหนาแน่นสูงของเหล็กกล้าไร้สนิมแตกต่างจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนความสามารถ ทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม มีข้อสังเกต 3 ประการคือ

(1) การที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีอัตราความคืบดี เมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส

(2) การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน (คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายความร้อน)

(3) การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมาก ๆ ได้โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย (เช่น ในการทำหลังคา)

## 2) คุณสมบัติเชิงกล

เหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70-80 % จึงทำให้มีคุณสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการคือ ความแข็งและความแกร่ง จะเห็นได้ว่าพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีความแข็งแรง และโมดูลัส ความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับแรงกระแทกโดยไม่แตกหักต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่า ที่เป็นกลางของทั้งความแข็ง ความแกร่ง และความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก และจะมีเพิ่มขึ้นอีกในชนิดออสเทนิติก และแสดงให้เห็นค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ว่าจะชนิดที่อ่อนตัวง่าย ซึ่งสามารถทำให้ขึ้นรูปเย็นได้ดี เช่น การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) จนถึงชนิดความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งได้จากการขึ้นรูปเย็นหรือการทำให้เย็นตัวโดยเร็ว (Quenching) หรือชนิดชุบแข็ง แบบตกผลึก (Precipitation Hardening) ซึ่งเหมาะใช้ทำสปริง เหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดกันที่มีโครงสร้างต่างกัน จะมีลักษณะค่าความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างกันดังในรูปจะแสดงให้เห็น แนวโค้งของค่าความแข็งแรง โดยทั่วไปของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ชนิด

(1) เกรดมาร์เทนซิติก มีค่าความจำนนความแข็งแรง (Yield Strength : YS) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength : UTS) สูงมากในสภาพที่ผ่านกระบวนการอบชุบ แต่จะมีค่าการยืดตัว (Elongation : EL %) ต่ำ

(2) เกรดเฟอร์ริติก มีค่าความจำนนความแข็งแรง และค่าความแข็งแรงสูงสุดปานกลาง เมื่อรวมกับค่าความยืดตัวสูง จึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ดี

(3) เกรดออสเทนิติก มีค่าความจำนนความแข็งแรงใกล้เคียงกับชนิดเฟอร์ริติก แต่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดและความยืดตัวสูง จึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก

(4) เกรดดูเพล็กซ์ (ออสเทนไนท์ - เฟอร์ไรต์) มีค่าความจำนนความแข็งแรง และค่าความยืดตัวสูงจึงเรียกได้ว่า เหล็กชนิดนี้มีทั้งความแข็งแรง และความเหนียว (Ductility) ที่สูงเป็นเลิศ

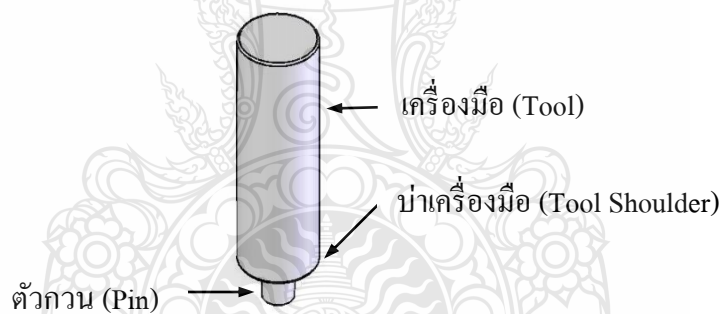
## 2.2 กระบวนการเชื่อม [6]

### 2.2.1 เครื่องมือ (Tool)

เครื่องมือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากสำหรับในการเชื่อมด้วยความเสียดทานเพราะเป็นตัวกลางในการเสียดสีเพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นระหว่างชิ้นงานสองชิ้น ดังนั้นเครื่องมือต้องทนความร้อนสูงกว่าโลหะชิ้นงานเชื่อมและมีความสามารถในการต้านทานแรงอัดและแรงเฉือนสูง เนื่องจากเครื่องมือต้องได้รับแรงอัดและแรงเฉือนในขณะที่ทำการเชื่อมตลอดเวลา

ลักษณะของเครื่องมือจากการศึกษาและวิจัยที่ผ่านมา มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลม โดยมีบ่าของเครื่องมือ (Tool Shoulder) เป็นตัวสัมผัสกับผิวชิ้นงานด้านบน และมีตัวกวน (Pin) ที่เข้าไปอยู่ในเนื้อของชิ้นงานทำให้เกิดการเสียดสีของวัสดุ

ลักษณะของแกนหมุนที่นิยมใช้อยู่ 3 ลักษณะ คือ แบบเป็นทรงกระบอกกลมหน้าตัดฉากแบบทรงกระบอกตรงหน้าตัดโค้งและแบบเป็นเกลียว ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมายังไม่ปรากฏแน่ชัดว่าเครื่องมือลักษณะใดมีความสามารถในการเชื่อมดีกว่าหรือด้อยกว่ากัน [14]



รูปที่ 2.1 ลักษณะของเครื่องมือ [1]

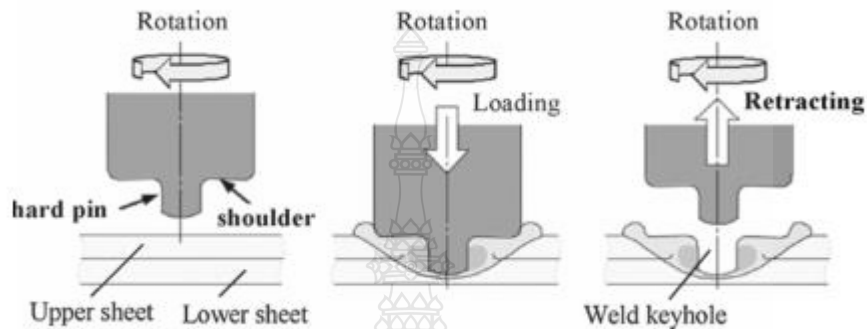
### 2.2.2 กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [6] ได้รายงานเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดของ รอยต่อเกลย โดยหลักการในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เครื่องมือที่หมุนจะถูกกดลงไปบนรอยต่อเกลยด้วยความเร็วรอบ ( $n$ ) โดยจุดศูนย์กลางของตัวกวนจะตรงกับศูนย์กลางของรอยต่อเกลยที่วางซ้อนกันอยู่ จนกระทั่งปลายของเครื่องมือถูกสอดเข้าไปในระยะความลึกที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 2 เกิดการเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวน (Pin) และบ่าของเครื่องมือ (Shoulder) ความร้อนที่เกิดทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเคลื่อนที่ไหลวนรอบตัวกวน ซึ่งการรวมตัวของวัสดุจะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ และตัวกวนจะถูกสอดอยู่ตามระยะเวลาที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 3 จากนั้นตัวกวนจะถูกยกขึ้น ทำให้เกิดรอยต่อขึ้น



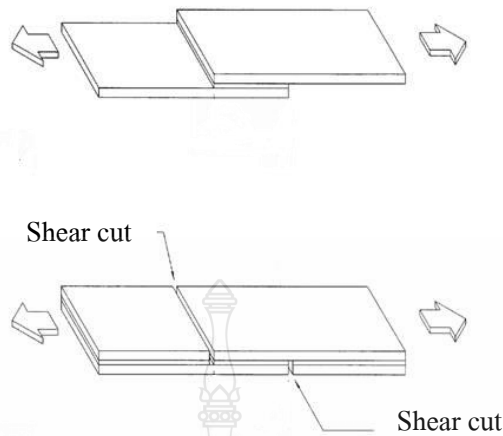
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด [15]

## 2.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

### 2.3.1 การทดสอบแรงเฉือน [16]

การทดสอบแรงเฉือนเป็นการใส่แรงกระทำในแนวนานกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ การเฉือนนี้แตกต่างจากการดึงและการตัดซึ่งใส่แรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงาน การทดสอบแรงเฉือนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ แรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear) และแรงเฉือนจากการบิด (Torsional Shear)

แรงเฉือนจะเกิดขึ้นถ้ามีการใส่แรงสวนทางกันสองทิศทาง โดยแรงเฉือนตรงสามารถแยกออกได้เป็นสองแบบคือแรงเฉือนเดี่ยว (Single Shear) กับแรงเฉือนคู่ (Double Shear) แรงเฉือนเดี่ยวจะเกิดขึ้นตลอดแนวระนาบเดียว ในขณะที่แรงเฉือนคู่จะเกิดระหว่างสองระนาบพร้อมกัน ในทางทฤษฎีความแข็งแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวกับแรงเฉือนคู่ควรมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการคั่งอจึงทำให้แรงเฉือนทั้งสองอาจไม่เท่ากันเสมอไป [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวของรอยต่อเกย [18]

ข้อจำกัดในการใช้การทดสอบแรงเฉือนตรง เนื่องจาก

- กำลังรับแรงเฉือนที่ได้เป็นค่าโดยประมาณของกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ
- หน่วยแรงดัด (Bending Stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือน/ระยะเยื้องศูนย์กลาง
- แรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือทดสอบ
- ระดับความแข็งและความคมของแผ่นเหล็กที่ใช้เลื่อนตัวอย่างทดสอบ
- ไม่สามารถหาสมบัติอื่นๆเช่น Elastic Strength และ Shearing Modulus of Elasticity

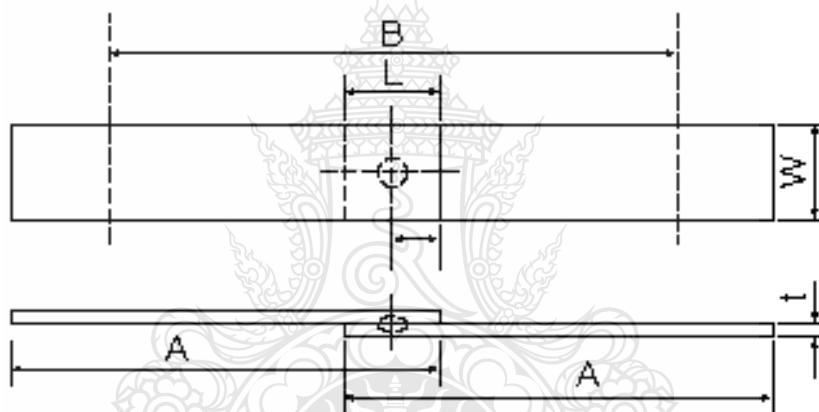
ของวัสดุได้ เนื่องจากไม่สามารถวัดหาค่า Shearing Strain

#### 2.3.1.1 ชิ้นทดสอบ (Specimens)

ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบนั้นผ่านกระบวนการตัดเฉือนที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ ความสะอาดของชิ้นงานก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดสอบเช่นกัน ชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบนั้น ต้องเก็บรักษาในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อป้องกันค่าคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ร้อนและเย็นเกินไป ชิ้นทดสอบรอยเชื่อมจุดด้วยวิธีการดึงโดยตรง ชิ้นทดสอบ (Specimens) โดยการดึงนั้น จะมีลักษณะภาคตัดขวางหลายแบบคือ อาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า ในกรณีของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดจะยึดตามมาตรฐาน (JIS G 3136) โดยมีสัดส่วนขนาดของชิ้นทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.4-2.5

ตารางที่ 2.1 ขนาดชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน (JIS G 3136)

Nominal thickness (t)	Width (W)	Lap allowance (L)	Test specimen length (A)	Distance between clamps (B)
$0.3 \leq t < 0.8$	20	20	75	70
$0.3 \leq t < 0.8$	30	30	100	90
$0.3 \leq t < 0.8$	40	40	125	110
$0.3 \leq t < 0.8$	50	50	150	110



รูปที่ 2.4 ชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน (JIS G 3136)

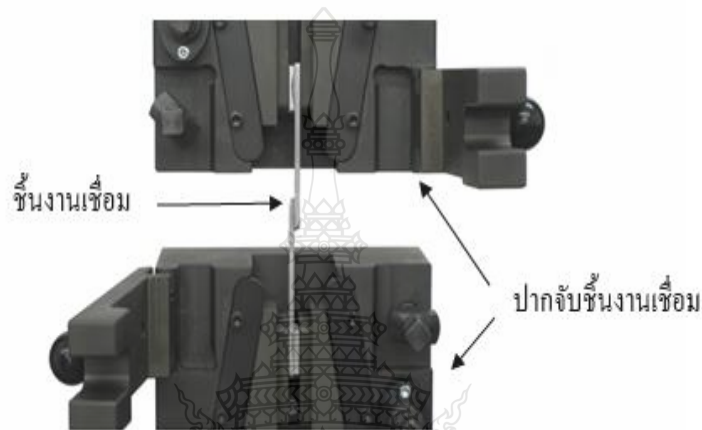
สำหรับการทดสอบแรงดึงโดยตรง เป็นวิธีการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมจุดโลหะเหล็กและที่ไม่ใช่เหล็กในทุกความหนา ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในหลายๆวิธี โดยการใช้แรงดึงโดยตรงให้ผิวหน้าร่วมของรอยเชื่อมจุด (Interface of Spot Weld) ขาดออกจากกัน [19]

### 2.3.1.2 วิธีการทดสอบ

การเลื่อนตรงและการเอนบิดส่วนใหญ่จะทดสอบด้วยการทดสอบแรงเฉือน โดยใน การทดสอบแรงเฉือนตรงหรือแบบสวนทางนั้น ชิ้นทดสอบจะถูกดึงสวนทางกัน การทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางนี้ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุ โดยความแม่นยำของค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความคมของชุดอุปกรณ์ดึงชิ้นทดสอบข้อจำกัดอื่นๆ



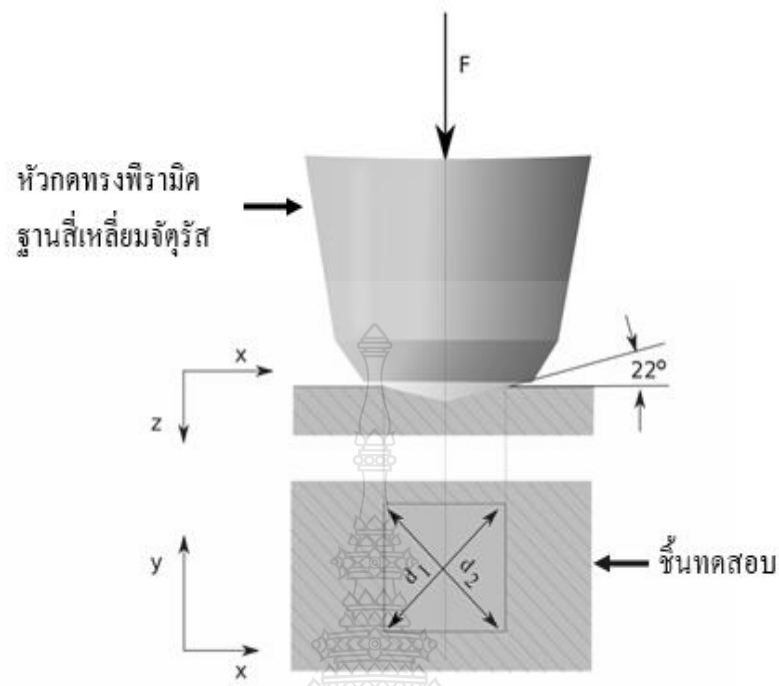
ในการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางคือไม่สามารถทำการจัดเก็บ ข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลส่วนนี้ได้ทำให้ไม่สามารถ คำนวณค่าความแข็งแรงช่วงยืดหยุ่นหรือ Modulus of Rigidity ได้สมบัติทางกลที่สามารถบอกได้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางมี เฉพาะแรงที่จำเป็นในการเฉือน ชิ้นทดสอบเท่านั้น และเมื่อนำไปเทียบกับขนาดหน้าตัดเริ่มต้นของชิ้น ทดสอบทำให้สามารถ คำนวณค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุโดยประมาณได้



รูปที่ 2.5 การทดสอบแรงเฉือนตรงหรือแบบสวนทาง

### 2.3.2 การทดสอบความแข็งแบบ Vickers [20]

เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศา ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบน ผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด  $F$  ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1-120 กิโลกรัมแรง โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของ หัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้ อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อน จะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม  $d_1$  และ  $d_2$  ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มม. ดังรูป 2.15 ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม ( $d$ ) จะถูกนำไป คำนวณค่าความแข็งดังนี้



รูปที่ 2.6 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers

ความแข็งของวิกเกอร์ส = แรงกด/พื้นที่ผิวรอยกด

$$\begin{aligned}
 HV &= 0.102F/S \\
 &= 0.102 \sin \alpha / 2 \cdot 2F/d^2 \\
 &= 0.1831 F/d^2
 \end{aligned}$$

เมื่อ HV = ความแข็ง

F = แรงกด (kg<sub>f</sub>)

D = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (mm) ของเส้นทแยงมุม d<sub>1</sub> และเส้นทแยงมุม d<sub>2</sub>

ข้อดี หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัด ความแข็งได้ถึงระดับ โครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วนหรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัด

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกดควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

## 2.4 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะวิทยา

ไพโรจน์ ฐานวิเศษ [21] กล่าวว่า การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography) เป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อตรวจสอบชนิดของภาค (Phase) การกระจายตัวของภาค ตลอดจนลักษณะและขนาดโครงสร้างผลึก การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope Structure) การตรวจสอบโครงสร้างทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ก็เพื่อต้องการทราบอิทธิพลของธาตุผสมในโลหะที่ทำการตรวจสอบนั้นๆ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากกระทำทางความร้อนสิ้นสุดลงด้วย และข้อมูลที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

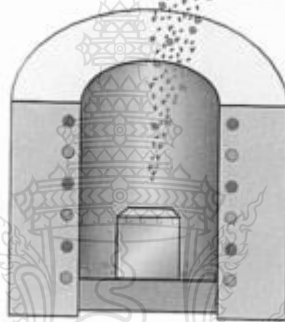
การเตรียมชิ้นส่วนเพื่อตรวจสอบทางโลหะวิทยามีขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง 5 ขั้นตอนคือ การตัดชิ้นงาน (Cutting) การขึ้นเรือน (Mounting) การขัดหยาบ (Roughing) การขัดละเอียด (Polishing) และการกัดกรด (Etching)

### 2.4.1 การตัดชิ้นงาน (Cutting)

เป็นการเลือกเฉพาะส่วนที่สนใจและเหมาะสมเพื่อนำมาเป็นตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของทั้งชิ้นงาน โดยต้องคำนึงถึงตำแหน่งและทิศทางที่เลือกด้วย เช่น ต้องการดูขวางแนวรีด หรือตามแนวรีด เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาการตัดให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เนื้อโลหะที่ถูกตัดนั้นเกิดความเสียหายหรือเปลี่ยน โครงสร้างไปอันเนื่องมาจากการตัด โดยปกติชิ้นงานโลหะก็มักจะตัดด้วยการตัดแบบขัดสี (Abrasion) โดยใบ ตัดทำจากเซรามิก เช่น  $Al_2O_3$  และ  $SiC$  เป็นต้น นอกจากนี้ขณะตัดก็ต้องมีการเลือกใช้ ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) แรงกระทำในการตัด (Cutting Force) และการหล่อเย็น (Cooling) ที่เหมาะสมกับโลหะที่ตัดเพื่อไม่ให้ผิวตัดถูกทำให้เสียหาย

#### 2.4.2 การทำตัวเรือน (Mounting)

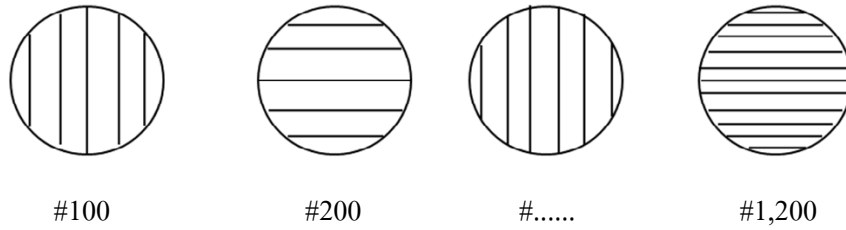
ชิ้นงานที่ตัดไว้ ต้องถูกนำไปปรับระนาบให้ ผิวเรียบโดยใช้มือจับขัด หรือใช้เครื่องขัดอัตโนมัติ ซึ่งขนาดที่เหมาะสมคือขนาดที่มือสามารถจับขัดได้ โดยปกติก็ควรจะมีขนาดหน้าตัดไม่เกิน 1.5 นิ้ว และความหนาไม่เกิน 1 นิ้ว หากชิ้นงานใหญ่เกินก็ตัดให้เล็กลง แต่ถ้าชิ้นงานเล็กมาก หรือบาง ไม่สามารถจับขัดได้ ก็ต้อง นำไปทำตัวเรือนขึ้นรูปร้อน ต้องอาศัยทั้งความดันและความร้อนในการทำให้พอลิเมอร์ที่ทำตัวเรือนเกิดการ หลอมและอัดตัวกันแน่น ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้คือเรซินประเภทฟีนอลิก (Phenolic Resin) ชิ้นงานที่จะนำมาทำตัวเรือนแบบร้อนนี้ ควรจะมีลักษณะเสถียรได้ ถึงช่วงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และสามารถทนแรงอัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



#### รูปที่ 2.7 การเตรียมชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค

#### 2.4.3 การขัดหยาบ (Roughing)

การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 100 200 600 800 1,000 และขัดจนถึงเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 การขัดผิวชั้นทดสอบ

#### 2.4.4 การขัดมัน (Polishing)

การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจจะใช้เพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

#### 2.4.5 การกัดกรด (Etching)

ลักษณะในโครงสร้างจุลภาค เช่น เกรน ของผสมยูเทคติก ของผสมยูเทคตอยด์ เป็นต้น ไม่สามารถมองเห็นแตกต่างกันได้ในสภาพขัดมัน จะต้องมีการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายซึ่งเป็นสารละลายกรด หรืออาจเป็นด่างก็ได้ ขึ้นกับโลหะที่นำมาทดสอบ รอย สารละลายเหล่านี้จะทำให้ปฏิกิริยากับเฟสต่าง ๆ ในโครงสร้างด้วยอัตราการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันทำให้ ผิวโลหะขรุขระเล็กน้อยแต่ เป็นความขรุขระที่เกิดจากลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันในโครงสร้างจุลภาค จึงเผยให้เห็นถึงสิ่งที่เราเรียกกันว่าโครงสร้างจุลภาคนั่นเอง

ณัฐ แก้วสกุล, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [22] ได้อธิบายตัวอย่างของน้ำยากัดผิวตรวจสอบของโลหะบางชนิด น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะชนิดต่าง ๆ แยกออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และน้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ดังตารางที่ 2.7 นี้ จะประกอบด้วยรายละเอียดของชื่อน้ำยาชนิดต่างๆ ตลอดจนส่วนผสมของน้ำยาเหล่านั้น นอกจากนี้ยังได้บอกเวลาในการกัด

ตารางที่ 22 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก [22]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric Acid and Hydrochloric)	กรดไนตริก (HNO <sub>3</sub> ) 3 มิลลิลิตร, ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 มิลลิลิตรและเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มชิ้นตรวจสอบ นาน 10-30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไนตริก (Ferric Chloride and Nitric)	ผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> ) ในกรดไฮโดรริก	เหล็กกล้าไร้สนิม	จุ่มแช่หรือเช็ดด้วยสำลี นาน 5-120 วินาที
ไนตริกและอะเซติก (Nitric and Acetic Acid)	ไนตริกแอซิด (HNO <sub>3</sub> ) 30 มิลลิลิตร ผสมกรดน้ำส้มอะเซติกแอซิด (CH <sub>3</sub> COOH) 20 มิลลิลิตร	เหล็กไร้สนิมที่มี ส่วนผสมของนิกเกิลและโคบอลต์เป็นจำนวนมาก	เช็ดถูด้วยสำลีชุบ กรด นาน 10-30 วินาที
โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ (Sodium metabisulfite)	โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 15 มิลลิลิตร ผสมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าเครื่องมือ รอบสูง	กัดด้วยกรดใน เวลา 10-60 วินาที
ไนทัล (Nital)	ไนตริกแอซิด (HNO <sub>3</sub> ) 1 มิลลิลิตร ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กชุบแข็งผิวและ เหล็กทั่วไป	กัดด้วยกรด นาน 10-15 วินาที
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid)	ไฮโดรคลอริกแอซิด (HCl) 50 มิลลิลิตร ผสมแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าที่มี ส่วนผสมของโครเมียมและนิกเกิล	กัดด้วยกรด นาน 10-30 วินาที

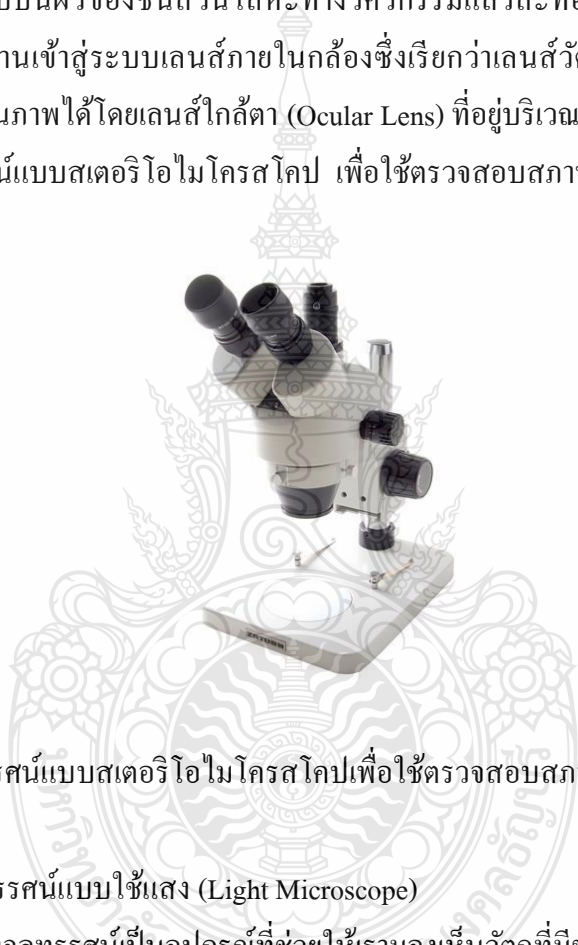
ตารางที่ 2.3 รายละเอียดของน้ำยาคัดชั้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [22]

น้ำยาคัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริก	กรดไนตริก (HNO <sub>3</sub> ) 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 90 มิลลิลิตร	ทองแดงและทองเหลือง	จุ่มหรือเช็ด นาน 10-30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไฮโดรคลอริก (Ferric Chloride and Hydrochloric Acid)	เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> ) 2-5 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5-30 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	ทองแดงผสม	จุ่มหรือเช็ดดูด้วยสำลี นาน 5-15 วินาที
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก ½ ถึง 2 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือเช็ด นาน 15-45 วินาที
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	เช็ดด้วยสำลี นาน 10-15 วินาที
กรดอะเซติก (Acetic Acid)	กรดอะเซติก 2-5 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	แมกนีเซียมผสม	จุ่มแช่
กรดไนตริกและกรดอะเซติก (Nitric Acid and Acetic Acid)	กรดไนตริก (HNO <sub>3</sub> ) 50 มิลลิลิตร ผสมกับกรดอะเซติก	นิกเกิลผสม	ควรรจุ่มหรือเช็ด น้ำยาในทันทีที่ผสมน้ำยาเสร็จ

## 2.5 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคปและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [23]

### 2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคป

กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคปมีหลักการทำงานเหมือนกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light Microscope) ซึ่งมีหลอดไฟทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตกกระทบบนผิวของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมแล้วสะท้อนออกจากผิวของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมผ่านเข้าสู่ระบบเลนส์ภายในกล้องซึ่งเรียกว่าเลนส์วัตถุ (Objective Lens) และผู้สังเกตสามารถมองเห็นภาพได้โดยเลนส์ใกล้ตา (Ocular Lens) ที่อยู่บริเวณด้านบนของกล้องในภาพที่ 2.9 คือ กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคป เพื่อใช้ตรวจสอบสภาพผิวแตกในระดับมหภาค



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคปเพื่อใช้ตรวจสอบสภาพผิวแตกในระดับมหภาค

### 2.5.2 จุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light Microscope)

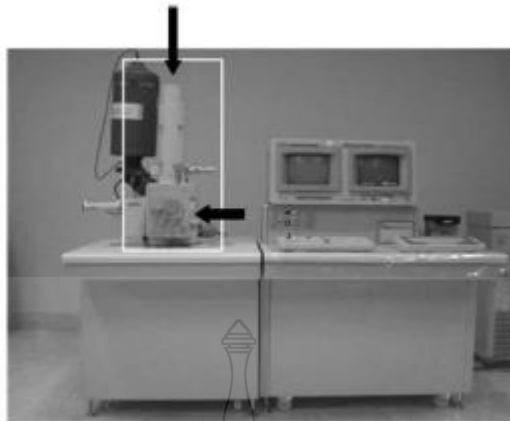
กล้องจุลทรรศน์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้เรามองเห็นวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ประกอบด้วยเลนส์นูนความยาวโฟกัสสั้นๆ 2 อัน โดยเลนส์อันหนึ่งอยู่ใกล้วัตถุเรียกว่าเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) และเลนส์อันหนึ่งอยู่ใกล้ตาเรียกว่าเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece Lens) โดยความยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุน้อยกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตามาก หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบมีสองเลนส์คือเลนส์ใกล้วัตถุกับเลนส์ใกล้ตาโดยที่เลนส์ใกล้วัตถุเป็นเลนส์ใกล้กับตัวอย่างที่คอยเป็นเลนส์แรกที่ทำหน้าที่ขยายภาพตัวอย่างให้ใหญ่ขึ้นกว่าเดิม โดยเลนส์ใกล้วัตถุสร้างภาพเป็นแบบภาพจริง แต่หัวกลับที่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นมาจากความจริง โดยตำแหน่งของภาพจะตกไปที่เลนส์ใกล้ตาทำให้เกิดภาพเสมือนหัวกลับที่มีขนาดขยายทำให้ตามองเห็นภาพได้ชัดเจน ทำให้สามารถมองเห็น



วัตถุตัวอย่างที่มีขนาดเล็กได้ เพราะหากมีแต่เลนส์ใกล้วัตถุอย่างเดียวจะทำให้ตาเราเห็นภาพตัวอย่างขนาดใหญ่ขึ้นก็จริงแต่จะเป็นแบบหัวกลับทำให้คุณภาพไม่รู้เรื่องดังนั้นจึงต้องมีอีกเลนส์หนึ่งที่ทำหน้าที่คอยกลับภาพเสมือนที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุนั้นให้กลับหัวอีกทีเพื่อให้ผู้ที่ใช้กล้องไมโครสโคปสามารถเห็นภาพตัวอย่างโดยที่ภาพไม่ได้มีการกลับหัว ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของตัวอย่างได้อย่างง่ายและแม่นยำมากขึ้น

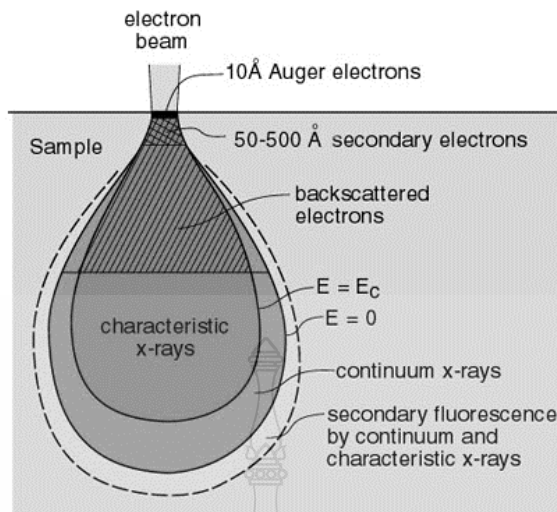
### 2.5.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เนื่องจากว่ากล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคปและกล้องจุลทรรศน์แบบแสง มีข้อจำกัดทางด้านกำลังขยาย ความชัดลึกของภาพ (Depth of Field) และความละเอียดในการแยกแยะภาพ (Resolution) โดย SEM ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มความสามารถในคุณสมบัติทั้งสามข้างต้น ซึ่ง SEM สามารถถ่ายภาพที่กำลังขยายต่ำจนถึงที่กำลังขยายสูงประมาณ 100,000 เท่าได้ สำหรับความชัดลึกของภาพนั้น กล้อง SEM สามารถที่จะมองเห็นพื้นผิวในลักษณะของ 3 มิติได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคปและกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงลักษณะพื้นผิวเป็นแบบ 2 มิติเท่านั้น ส่วนคุณสมบัติด้านความละเอียดในการแยกแยะภาพ (Resolution) หมายถึงความสามารถที่จะแจกแจงรายละเอียดโดยการแยกของสองสิ่งที่อยู่ใกล้กันในระยะหนึ่งให้ออกว่าไม่ใช่สิ่งเดียวกันหรือเป็นจุดเดียวกัน กล้อง SEM สามารถที่จะแยกแยะรายละเอียดได้ดีกว่าสิ่งที่ได้กล่าวมา ข้างต้นจึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้การตรวจสอบในระดับจุลภาคได้มีการนำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาและตรวจสอบสภาพผิวแตกของชิ้นส่วน โลหะทางวิศวกรรมแสดงภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL 540 LV เมื่อพิจารณาบริเวณด้านบนสุดของคอลัมน์ (ลูกศร) ในรูปที่ 2.10 คือส่วนของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งภายในแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยโลหะรูปกรวยหรือ Wehnelt Cylinder ภายในมีไส้ที่ทำมาจากโลหะทั้งสแตน หรือเรียกว่า ฟิลาเมนต์ (Filament)



**รูปที่ 2.10** กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL 540 LV เพื่อใช้ตรวจสอบสภาพผิวแตกในระดับจุลภาค

ซึ่งเป็นตัวให้อิเล็กตรอน เมื่อให้ความต่างศักย์กับ Filament ที่อยู่ในระบบสุญญากาศ พบว่ามีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากบริเวณปลายสุดของ Filament เป็นจำนวนมาก อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกควบคุมโดยสนามแม่เหล็ก ซึ่งเรียกว่า Electromagnetic Lens โดยเลนส์ชนิดนี้ มีหน้าที่รวบรวมลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กที่สุด และมีความเข้มสูงสุดลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนผิวของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electrons) ชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมจะถูกนำมาวางไว้ในช่องใส่ ตัวอย่างที่อยู่บริเวณด้านล่างของคอลัมน์ (ลูกศร) หรือเรียกว่า Chamber สิ่งที่เกิดขึ้นหลังจาก อิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบบนผิวของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมคือสัญญาณอิเล็กตรอนซึ่ง มีด้วยกันหลายชนิด แบ่งตามความลึกของอิเล็กตรอนที่กระทบกับอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม [24]

เมื่อลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบบนผิวชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม เกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนของอะตอมภายในผิวชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม ซึ่งมีการชนกัน ลักษณะคือ การชนแบบยืดหยุ่น ซึ่งเป็นการชนแบบไม่มีการสูญเสียพลังงาน โดยอิเล็กตรอนที่สะท้อนหรือหลุดออกไปจะมีพลังงานสูง ซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electrons, BE) เมื่อตรวจสัญญาณของ BE แปลงเป็นสัญญาณภาพบนจอ CRT โดยภาพที่เกิดขึ้นบนจอ CRT จะสามารถบ่งบอกระดับความสูงต่ำของพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันมาก ๆ ได้และนอกจากนั้นยังสามารถบอกถึงการกระจายของธาตุที่มีเลขอะตอมต่างกันสูงได้ เช่น การกระจายตัวของอนุภาคทองคำบนแผ่นพลาสติก โดยบริเวณที่สว่างจะบ่งบอกว่าบริเวณนั้นคืออนุภาคทองคำซึ่งมีปริมาณของ BE เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณแผ่นพลาสติก นอกจากนี้ยังมีการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งเป็นการชนกันแบบมีการสูญเสียพลังงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) และมีการคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่ารังสีบ่งบอกเฉพาะธาตุ (Characteristic X-rays) เมื่อแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนชนิด ทุติยภูมิให้เป็นภาพบนจอ CRT สามารถบ่งบอกรายละเอียดและลักษณะพื้นผิวของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม นอกจากนี้ยังมีการตรวจจับสัญญาณรังสีบ่งบอกเฉพาะธาตุที่เกิดขึ้น เพื่อวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีในบริเวณที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบบ

## 2.6 การตรวจสอบสภาพผิวแตก

เนื่องจากความเสียหายที่เกิดจากการรับภาระกรรมทางกลนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของภาระกรรมที่กระทำจากภายนอกซึ่งแบ่งออกได้เป็นลักษณะคือ การรับภาระกรรมแบบสถิต (Static) คือ ชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมรับแรงคงที่ตลอดเวลาและการรับภาระกรรมแบบพลวัต (Dynamic) คือ ชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมรับแรงไม่คงที่ตลอดเวลา นอกจากนี้ชนิดของภาระกรรมที่กระทำกับ ชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม เช่น แรงดึง แรงเฉือน แรงบิด มีผลกระทบต่อลักษณะของผิวแตกที่ปรากฏด้วย ดังนั้นในการตรวจสอบสภาพผิวแตกต้องทำการตรวจสอบสภาพของผิวแตกทั้งในระดับมหภาคและจุลภาคด้วยเสมอ เพื่อเป็นการยืนยันสภาพผิวแตกที่ปรากฏว่ามีลักษณะที่สอดคล้องหรือขัดแย้งกัน [25, 26]

2.6.1 การตรวจสอบในระดับมหภาค เป็นการตรวจสอบผิวแตกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอไมโครสโคป ที่กำลังขยายต่ำหรืออาจใช้แว่นขยาย แม้กระทั่งใช้สายตาของผู้ตรวจสอบที่มีความชำนาญเฉพาะด้านผิวแตก ในการตรวจสอบบางครั้งพบว่าอาจจะได้ข้อมูลมากจนไม่ ต้องอาศัยข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยการตรวจสอบ โดยวิธีอื่นของการวิเคราะห์ความเสียหาย ทำให้สามารถสรุปสาเหตุของความเสียหายได้ เช่นกัน รายละเอียดของผิวแตกที่ปรากฏทำให้ผู้ตรวจสอบสามารถตั้งข้อสมมติฐานได้ว่าภาระกรรมแบบใดที่กระทำกับชิ้นส่วนโลหะทาง วิศวกรรมจนส่งผลให้มีความเสียหายเกิดขึ้นและผลที่ได้จากการตรวจสอบในระดับมหภาคจะ บ่งบอกว่าชิ้นส่วนโลหะทาง วิศวกรรมเกิดการ เปลี่ยนรูป (Deformation) หรือไม่ สีของผิวแตก ที่ปรากฏมีลักษณะอย่างไรเมื่อมีการ สะท้อนของแสงเข้าสู่ตาของผู้ตรวจสอบ (สว่างหรือมืด) และมีทิศทางของการแตกไปในทิศทางใด รวม ถึงการพิจารณาผิวแตกว่ามี texture ของผิวแตก (มีลักษณะของผิวที่เรียบหรือหยาบ) และ โครงสร้างผลึกเป็นแบบ Silky, Granular หรือ แบบ Fibrous สิ่งที่สำคัญของการตรวจสอบในระดับ มหภาคคือการหาจุดเริ่มต้นของการแตกหักซึ่งเป็น เป้าหมายเริ่มต้นของการตรวจสอบผิวแตกและมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ความเสียหาย ลักษณะเฉพาะของผิวแตกที่พบเห็นได้บ่อยเช่น Ratchet Marks, Chevrons ซึ่งลักษณะของผิว แตกทั้ง ชนิดจะบ่งชี้ถึงทิศทางของการขยายตัว ของรอยแตก และมีร่องรอยที่ชี้กลับไปยังจุดเริ่ม ต้นส่งผลทำให้ผู้ตรวจสอบสภาพผิวแตกสามารถระบุจุดเริ่มต้นของการ แตกหักได้ สำหรับกรณีที่ตรวจสอบแล้วพบร่องรอย Beach Marks ทำให้สามารถตั้งข้อสันนิษฐานได้ ว่าชิ้นส่วนโลหะทาง วิศวกรรมเกิดความล้าขึ้น

2.6.2 การตรวจสอบแบบในระดับจุลภาค เป็นการตรวจสอบผิวแตกของชิ้นส่วน โลหะทาง วิศวกรรมที่เสียหายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อตรวจสอบสภาพผิวแตก โดยรวมซึ่ง ถ้าผิวของชิ้นส่วนโลหะทาง วิศวกรรมมีลักษณะผิวแตกเป็นแบบ Dimple ทั้งหมด ทำให้

สรุปได้ว่าเป็นการแตกหักแบบ เหนียว ในกรณีผิวแตกแสดงถึงลักษณะของคลิเวจทั้งหมด (Cleavage Facets) เป็นการแตกหักแบบเปราะหรืออาจเกิดผสมในกรณีในชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมตัวอย่างไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน บริเวณของเนื้อวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหนียวจะแสดง ลักษณะผิวแตกแบบ Dimple ส่วนบริเวณของเนื้อวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เปราะแสดงผิวแตกแบบ Cleavage และยังมีผิวแตกที่เกิดจากความเสียหายแบบความล้าซึ่งจะพบร่องรอยของ Striations Lines เกิดขึ้น

## 2.7 ลักษณะของสภาพผิวแตก [23]

ลักษณะของสภาพผิวแตกที่พบได้บ่อยกับชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมเนื่องจากการรับภาระกรรมทางกลส่วนใหญ่แล้วแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ คือ

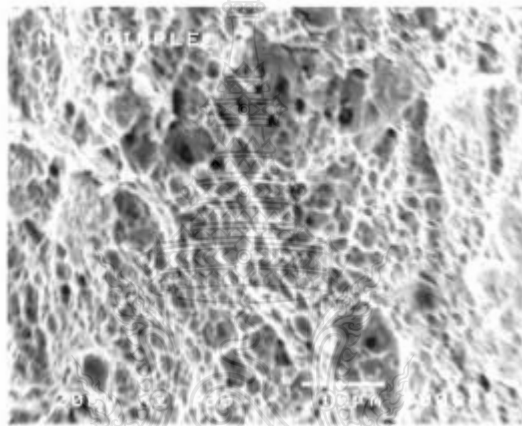
### 2.7.1 การแตกหักแบบเหนียว (Dimple Fracture)

เป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงของ Plastic Deformation พร้อมกับมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ (Slow Crack Growth) โดยภาระกรรมที่กระทำกับชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมอาจจะเป็นแรงดึง แรงเฉือน แรงบิด แรงฉีกหรือแรงคด สำหรับกรณีที่ได้รับ แรงดึงและวัสดุมีความเหนียวสูงลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมพบว่า เกิดการคอดตัว (Necking) ส่งผลทำให้พื้นที่หน้าตัดตรงบริเวณที่แตกหักมีขนาดลดลง และลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบ Cup and Cone ดังแสดงในรูปที่ 2.12

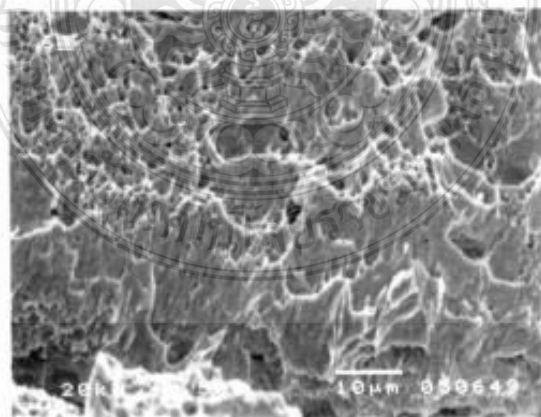


รูปที่ 2.12 ลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบ Cup and Cone

ผลที่ได้จากการตรวจสอบในระดับมหภาคแสดงลักษณะของผิวแตกที่เห็นเป็นแบบ Fibrous หรือ Silky และพื้นที่ผิวแตกมีสีเทา เนื่องจากการสะท้อนของแสง ส่วนผลที่ได้จากการตรวจสอบในระดับจุลภาคแสดงลักษณะของผิวแตกเป็นแบบ Dimple โดยถ้าชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมได้รับการกระทบแบบ Overload และแรงที่กระทำเป็นแบบแรงดึง ลักษณะของ Dimple ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.13 สำหรับกรณีที่ชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมได้รับการกระทบแบบ Overload เช่นเดียวกัน แต่ชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมได้รับแรงเฉือน ลักษณะของ Dimple ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะยี่ดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.14



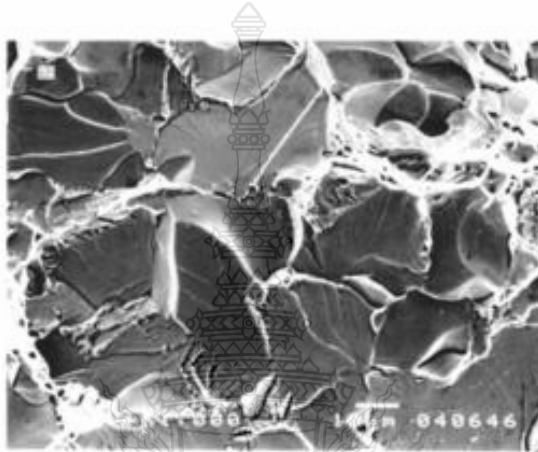
รูปที่ 2.13 ลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบ Dimple เมื่อได้รับการกระทบแบบ Overload และแรงดึง



รูปที่ 2.14 ลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบ Dimple เมื่อได้รับการกระทบแบบ Overload และแรงเฉือน

### 2.7.2 การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture)

การแตกหักแบบเปราะ เป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นในช่วง Plastic Deformation น้อยมาก หรือแทบไม่มีเลย โดย มีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Fast Crack Growth) ส่วนใหญ่แล้วเกิดขึ้นในช่วง Elastic Deformation ลักษณะของ ผิวแตกที่ปรากฏจะมีผิวหน้าที่เรียบและเป็นมันวาว (Smooth and Shiny Facets) ดังแสดงรูปที่ 2.15



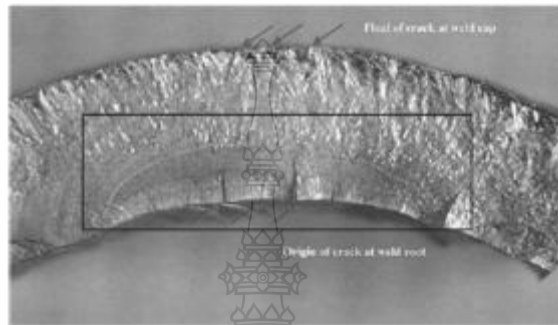
รูปที่ 2.15 ลักษณะผิวแตกที่ปรากฏเป็นแบบเปราะ

### 2.7.3 การแตกหักแบบความล้า (Fatigue Fracture)

เป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ได้รับภาระกรรมแบบพลวัตจนชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมเสียหาย เมื่อทำการตรวจสอบผิวแตกในระดับมหภาคจะพบลักษณะผิวแตกแบบ Beach Marks ซึ่งมีลักษณะเป็นรอยโค้งคล้ายรอยของคลื่นบนชายหาดและเมื่อตรวจสอบผิวแตกในระดับจุลภาคตรงบริเวณของ Beach Marks พบ Striations Lines นอกจากนี้แล้วได้มีการแบ่งลักษณะพื้นผิวของผิวแตกเนื่องจากความล้าออกเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณจุดเริ่มต้นบริเวณการขยายตัวของรอยแตกและบริเวณสุดท้ายของการแตกหัก

กฤษ เหลือง โสภานันท์ และฉวีวรรณ พุฒนันท์กุล [23] ได้รายงานกรณีศึกษาการตรวจสอบสภาพผิวแตก ของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมที่เสียหายจากการรับภาระกรรมทางกล ท่อที่ผ่านการเชื่อมซึ่งทำจากวัสดุเหล็กกล้า ไร้สนิมได้ผ่านการใช้งานแล้วในระยะเวลาหนึ่งจึงมีความเสียหายเกิดขึ้น

1) การตรวจสอบในระดับมหภาค สิ่งที่ได้อาจจากการตรวจสอบ คือ พบร่องรอยของ Beach Marks (กรอบสี่เหลี่ยม) ในรูปที่ 2.15 โดยมีลักษณะเป็นรอยโค้งคล้ายรอยของคลื่นบนชายหาดตรงบริเวณด้านล่างของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมและ Ratchet Marks ซึ่งบ่งชี้ถึงจุดเริ่มต้นของรอยแตก (ลูกศรตรงบริเวณด้านล่างของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรม) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

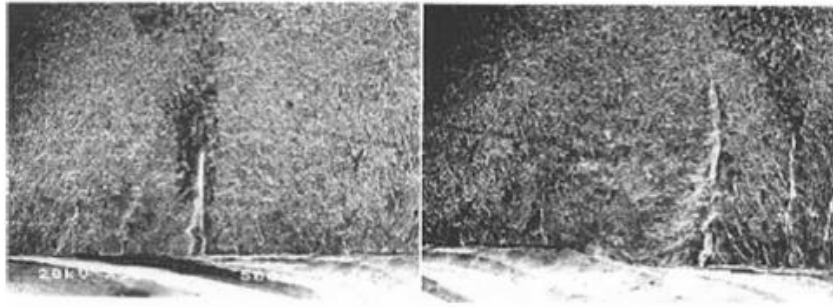


รูปที่ 2.16 ผิวแตกของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมจากการตรวจสอบในระดับมหภาค

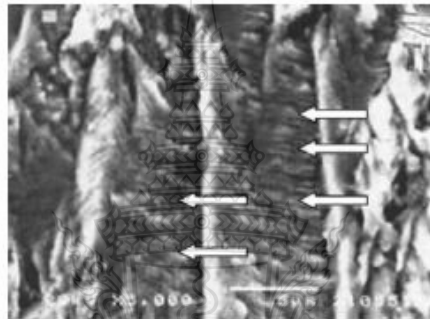
2) การตรวจสอบในระดับจุลภาค ภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงจากการใช้กล้อง SEM เพื่อดูบริเวณผิวแตกของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมตรงบริเวณจุดเริ่มต้นแสดงถึงภาพของ Ratchet Marks ที่ชัดเจนขึ้น ดังในรูปที่ 2.17 สำหรับบริเวณถัดจากจุดเริ่มต้นขึ้นไปด้านบนคือ บริเวณการขยายตัวของรอยแตกซึ่งอยู่ในช่วง ของ Beach Marks รูปที่ 2.16 สิ่งที่ได้อาจจากการ ตรวจสอบในระดับจุลภาคคือ ภาพของ Striations Lines (ลูกศร) ดังในรูปที่ 2.18 เนื่องจากมีขนาด ที่เล็กมากภาพที่ถ่ายได้จึงมีกำลังขยายที่ 5,000 เท่าในถ่ายภาพจากกล้อง SEM เมื่อพิจารณา บริเวณด้านบนของรูปที่ 2.16 พบว่าเป็นบริเวณ สุดท้ายของการแตกหัก ซึ่งภาพ SEM ที่ ได้จากการตรวจสอบลักษณะของผิวแตกเป็นแบบ Dimple เนื่องจากเป็นบริเวณสุดท้ายที่วัสดุไม่สามารถที่จะรับแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมได้อีกต่อไป ผิวที่ปรากฏจึงมีลักษณะที่ยืดตัวออกไปในทิศด้านบนของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.19

จากรูปที่ 2.16 จนถึงรูปที่ 2.19 คือสิ่งที่ได้ทั้งหมดจากการตรวจสอบสภาพผิวแตกทั้งในระดับมหภาคและระดับจุลภาค ซึ่งสอดคล้อง กับลักษณะของผิวแตกที่เป็นการแตกหักแบบความล้า

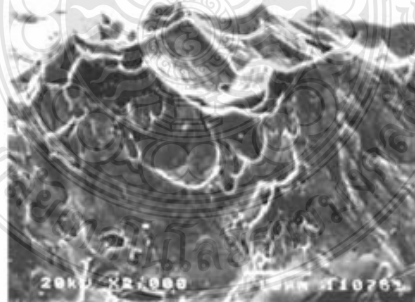




รูปที่ 2.17 ภาพถ่าย SEM ตรงบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยแตกซึ่งแสดงถึง Ratchet Marks ที่ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 2.18 ภาพถ่าย SEM ในช่วงของ Beach Marks พบ Striations Lines (ลูกศร) ที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM ตรงบริเวณสุดท้ายของรอยแตกแสดงลักษณะผิวแตกเป็นแบบ Dimple

สรุปได้ว่าชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมมีความเสียหายเกิดขึ้นเนื่องจากความล้าโดยที่ต้องรับภาระกรรมแบบพลวัตตลอดเวลาจากการที่มีของไหลผ่าน

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fujimoto et al. [1] กระทบวนเชื่อมในสภาวะของแข็งชนิดใหม่ที่มีชื่อว่า “การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนจุด (Friction Spot Joining)” ในการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด 5000 และ 6061 โดยอาศัยความร้อนจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุและตัวกวน โดยมีตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการเชื่อม คือ ความเร็วรอบของตัวกวน (Tool Rotational Speed) แรงกดของตัวกวน (Axial Load) ความลึกของตัวกวน (Plunging Depth) และเวลาที่กดแช่ (Loading Time) ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่ออลูมิเนียม 6061 มีค่าความแข็งแรงสูงสุดใกล้เคียงกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้โดยมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard: JIS) ค่าความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นอลูมิเนียม 6061 หนา 1 มม. มีค่าประมาณ 2700 นิวตัน สามารถหาได้จากการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที แรงกด 3920 นิวตัน และเวลากดแช่ 1.2 วินาที อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของรอยต่อไม่ได้แสดงไว้

Tanaka and Kumagai [2] ใช้ FSJ เชื่อมรอยต่อเกยอลูมิเนียม 6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายของตัวกดสอดเข้าไปในอลูมิเนียมกับรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม กับความเร็วรอบของตัวกวน พบว่าความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุดและค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ระยะห่างระหว่างปลายตัวกวนและรอยต่อของเหล็ก/อลูมิเนียมที่ค่า 0.2-0.3 มม. ค่าความแข็งแรงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าสารประกอบกิ่งโลหะปริมาณเล็กน้อยก่อตัวขึ้นที่บริเวณรอยต่อแต่ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเนื่องจากรอยฉีกขาด (Fracture Path) ของรอยต่อไม่ได้เกิดขึ้นผ่านแนวนี้ แต่เป็นการฉีกขาดแบบดึงขาดรอยต่อ (Pulled Out Fracture)

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [6] รายงานผลการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด เช่น ความเร็วในการกดตัวกวนลงสู่รอยต่อ ความเร็วรอบของตัวกวน และระยะเวลากดแช่ของตัวกวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผลการทดลองพบว่า รอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด และแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อเกยประมาณ 95 % ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการทดลอง การเพิ่มความเร็วในการกดความเร็วรอบของตัวกวน การเพิ่มระยะเวลาทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความเร็วดังกล่าวคาดว่าจะทำให้ความร้อนเสียดทานเพิ่มและส่งผลต่อการเกาะยึดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการทดลองนี้ได้วางแผนการดำเนินการเพื่อศึกษากระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining: FSJ) ในการเชื่อมรอยต่อเกลียววัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 โดยทำการเชื่อมลักษณะรอยต่อเกลียวขึ้นทดสอบแรงดึงเฉือน (Shear Tensile Test) ซึ่งผลของการเชื่อมตามลักษณะข้างต้นทำให้วัสดุสองชนิดสามารถยึดติดกันได้ และสามารถศึกษาอิทธิพลตัวแปรต่างๆ โดยนำรอยเชื่อมมา ศึกษาสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบแรงดึง โดยใช้เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ และทำการส่องดูโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมขึ้นทดสอบเพื่อเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างของรอยเชื่อมและแนวการพังทลาย

#### 3.1 การเลือกวัสดุและเตรียมอุปกรณ์การเชื่อม

##### 3.1.1 วัสดุ

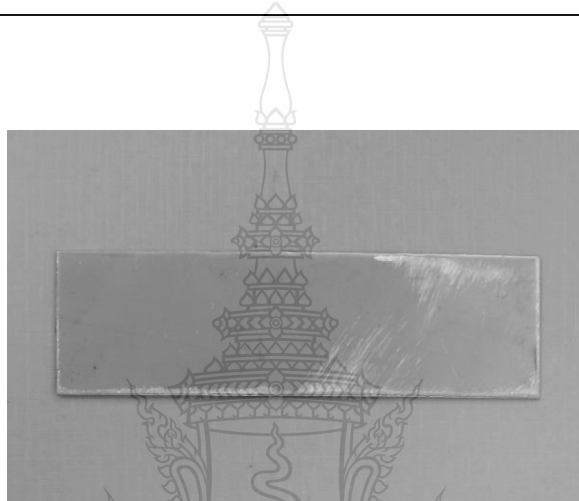
สำหรับวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานเชื่อมเพื่อศึกษาตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกลียวในการทดลองนี้ คือ อลูมิเนียมเกรด AA1100 แสดงดังรูปที่ 3.1 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยที่วัสดุทั้งสองได้แสดงส่วนผสมทางเคมีไว้ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 อลูมิเนียมเกรด AA1100

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม AA1100

อะลูมิเนียมผสม AA1100								
Fe	Al	C	S	Cr	Si	N	Mn	Ni
-	สมดุล	-	-	-	<0.95	-	<0.05	-
P	Cu	Zn						
-	0.05-0.2	<0.10						

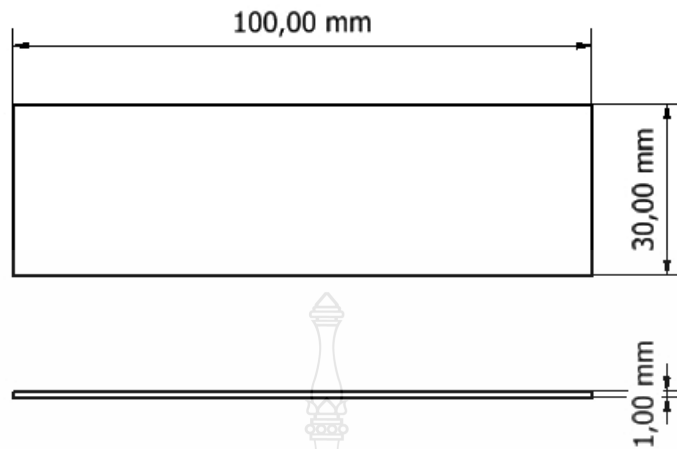


รูปที่ 3.2 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

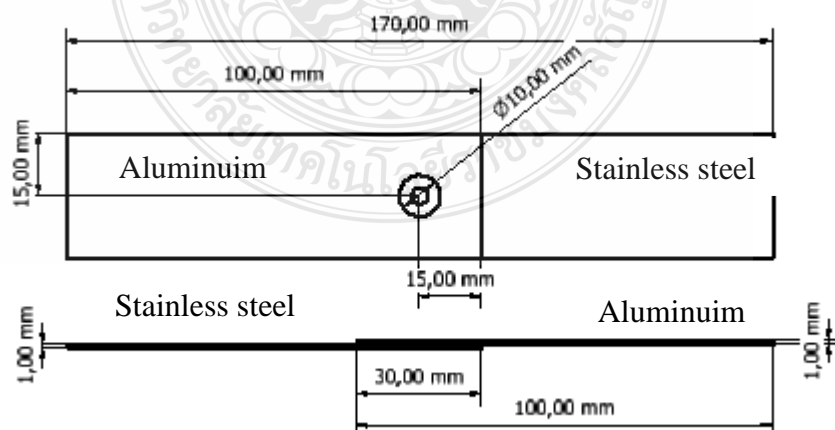
เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304								
Fe	Al	C	S	Cr	Si	N	Mn	Ni
สมดุล	-	0.05	0.004	18.17	0.384	0.037	1.042	8.070
P	Cu	Zn						
0.028	-	-						

การเตรียมขนาดชิ้นทดสอบซึ่งต้องนำวัสดุมาตัดตามขนาดดังรูปที่ 3.3 ที่แสดงหน่วยเป็น มม. ขนาดของชิ้นงานทดสอบดังกล่าวได้อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS3136 [4] โดยมีขนาดของชิ้นงานกว้าง 30 มม. ยาว 100 มม. และหนา 1 มม. แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงาน

หลังจากที่ได้ขนาดของชิ้นทดสอบดังกล่าวตามมาตรฐานแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อม โดยการนำอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 มาตัดตามแนวรีดเพื่อไปทดสอบแรงดึง โดยตัดชิ้นงานความกว้าง 30 มม. และความยาว 100 มม. นำมาทำการขัดให้มีผิวเรียบและตั้งฉากโดยกระดาษทรายเบอร์ 240 และทำความสะอาดด้วยอะซิโตนซึ่งชิ้นทดสอบสำหรับการเชื่อม FSJ ถูกนำมาวางต่อเกลตามลักษณะการเชื่อมดังรูปที่ 3.4 โดยให้ชิ้นงานอะลูมิเนียม AA1100 วางอยู่ด้านบนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีการวางซ้อนกันเป็นความยาว 30 มม. ตำแหน่งของการเชื่อมจุดศูนย์กลางจะอยู่ห่างจากขอบของการซ้อนกันมีความยาวด้านละ 1.5 มม.



รูปที่ 3.4 รูปแบบของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบต่อเกล

### 3.1.2 การเตรียมอุปกรณ์การเชื่อม

ขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining: FSJ) ซึ่งในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษารอยต่อเกลยขึ้นทดสอบในลักษณะรอยต่อเกลยขึ้นทดสอบแรงเฉือนแบบดึง (Shear Tensile Test) ซึ่งรูปแบบของขึ้นทดสอบในการศึกษา FSJ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 สำหรับการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดมีดังนี้

#### 3.1.2.1 เครื่องมือเชื่อม

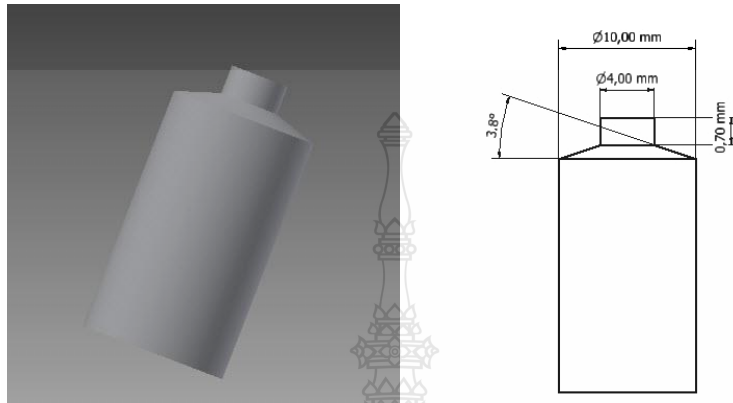
ในการออกแบบเครื่องมือเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อม FSJ รอยต่อเกลยขึ้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงความหนาของวัสดุที่ถูกออกแบบให้วางทางด้านบนของรอยต่อ ทั้งนี้เพื่อให้ปลายของตัวกวน (pin) สัมผัสที่บริเวณอินเทอร์เฟซของการเชื่อมได้อย่างเหมาะสม โดยเครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมมีปลาย ตัวกวนเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. มีรูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อมมีขนาดเท่ากับ 10 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5-3.9 ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ซึ่งมีความทนต่อการสึกหรอดี และรักษาคมตัดได้ดีเยี่ยม รวมทั้งมีคมเหนียวแน่นสูง ความแข็งสูงมากเมื่อผ่านการชุบแข็งทนต่อการเสียดสีดีมากทนต่อแรงกดอัดได้ดีเยี่ยม

เครื่องมือเชื่อม T1 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของบ่าแบนเรียบ ขนาดของบ่าเครื่องมือเชื่อมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ตัวกวนเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. แสดงในรูปที่ 3.5



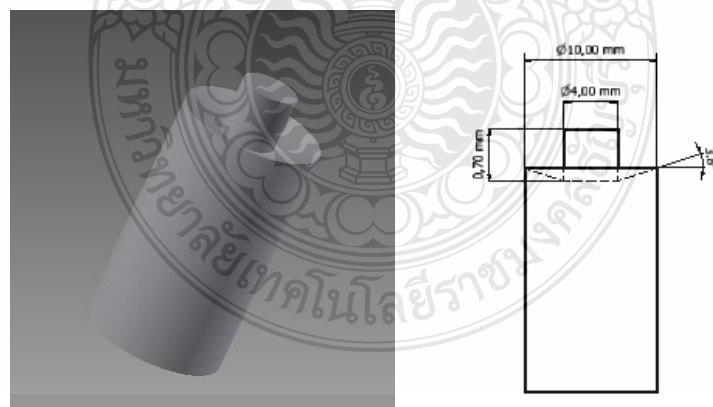
รูปที่ 3.5 เครื่องมือเชื่อม T1 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะแบนเรียบ

เครื่องมือเชื่อม T2 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของบ่าเรียบเอียงออก บ่าของเครื่องมือทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เอียงออกด้านนอก 3.8 องศา ตัวกวนเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. แสดงในรูปที่ 3.6



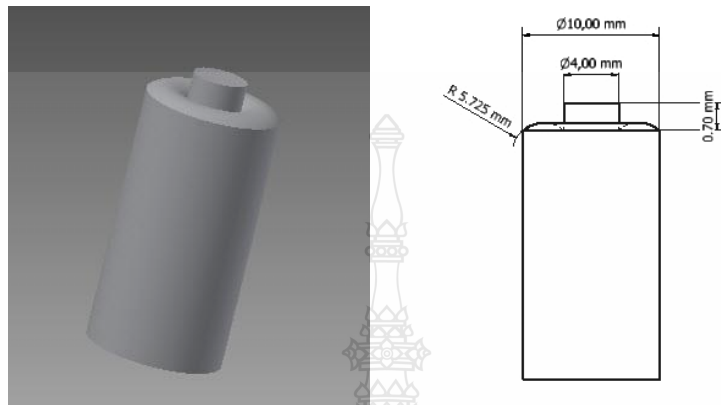
รูปที่ 3.6 เครื่องมือเชื่อม T2 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะเอียงออก

เครื่องมือเชื่อม T3 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของบ่าเรียบเอียงเข้าด้านใน บ่าของเครื่องมือทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เอียงเข้าด้านใน 3.8 องศา ตัวกวนเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. แสดงในรูปที่ 3.7



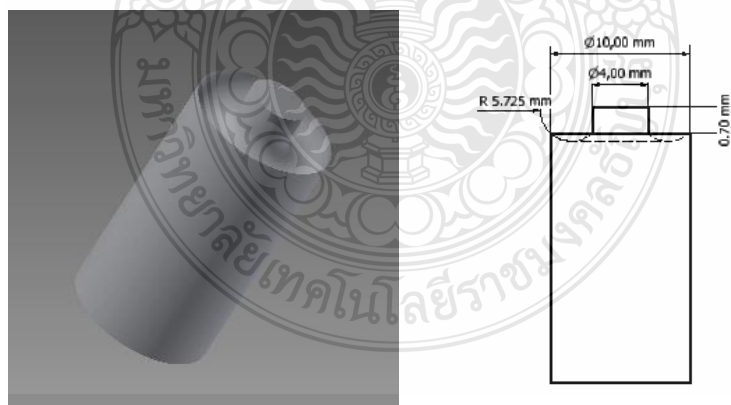
รูปที่ 3.7 เครื่องมือเชื่อม T3 รูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะเอียงเข้าด้านใน

เครื่องมือเชื่อม T4 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของ โคนงูนออกด้านนอก ป่าของเครื่องมือ ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. โคนงูนออกด้านนอกด้วยรัศมีความโค้ง 5.725 มม. ตัวกวน เป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องมือเชื่อม T4 รูปทรงของป่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะนูนออก

เครื่องมือเชื่อม T5 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของ โคนงั่วเข้าด้านในป่าของเครื่องมือ ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. โคนงั่วเข้าด้านในด้วยรัศมีความโค้ง 5.725 มม. ตัวกวนเป็น รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. แสดงในรูปที่ 3.9

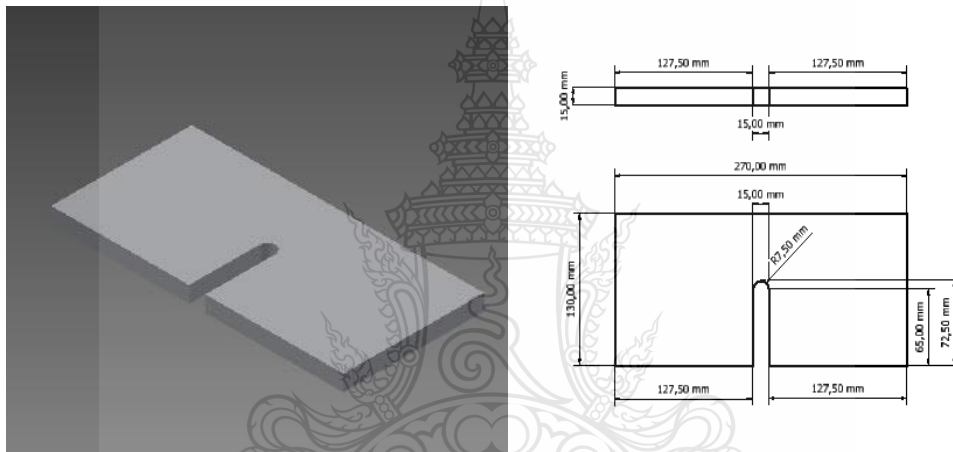


รูปที่ 3.9 เครื่องมือเชื่อม T5 รูปทรงของป่าเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะ โคนงั่วเข้า

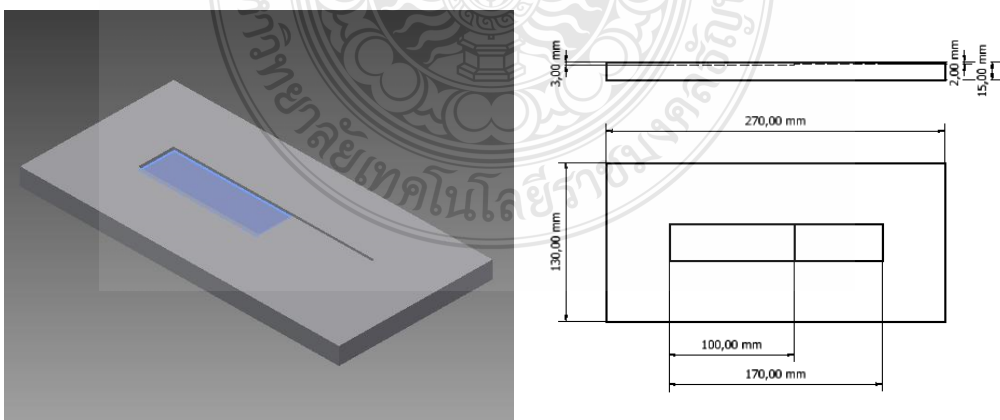
### 3.1.2.2 อุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบ



เนื่องจากกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining : FSJ) ในการทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดแบบอัตโนมัติในการทดลองเชื่อม เพื่อให้ชิ้นทดสอบการเชื่อมถูกวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทุกๆ ตัวอย่าง จึงได้ออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบการเชื่อมในลักษณะต่างๆ โดยส่วนที่เป็นฐานรองรับชิ้นทดสอบนั้นเมื่อวางชิ้นทดสอบที่ซ้อนประกบกันแล้วจะมีอุปกรณ์ยึดกดด้านบน เพื่อให้ชิ้นทดสอบอยู่นิ่ง ไม่เคลื่อนไปมาได้หรือสูงเกิน ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์จับยึดที่ไม่เหมาะสมนั้นส่งผลต่อการเชื่อมยึดของรอยต่ออย่างแน่นอน เพื่อให้ตัวแปรในการศึกษานี้อยู่ในการควบคุมจึงต้องให้ความสำคัญในจุดนี้ด้วย ลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์จับยึดดังแสดงในรูปที่ 3.11-3.13



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์จับยึดแผ่นบน

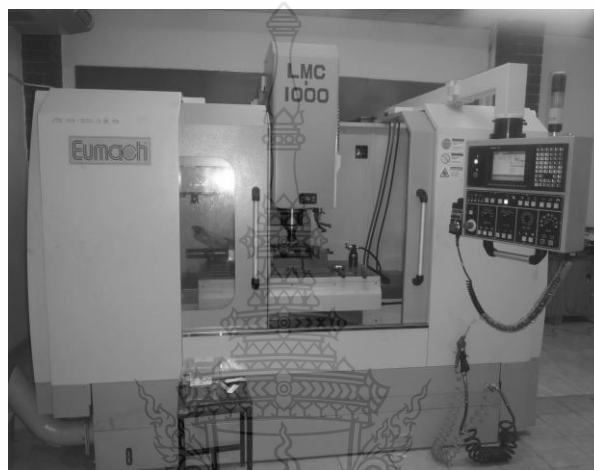


รูปที่ 3.11 อุปกรณ์จับยึดแผ่นล่าง

อุปกรณ์จับยึดนี้จะต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงพอสามารถรองรับแรงกดในขณะที่ทำการเชื่อมได้ดีโดยที่ไม่เกิดการโก่งงอ วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์จับยึดทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำขึ้นรูปให้เหมาะสมกับขนาดขึ้นทดสอบการเชื่อมของแต่ละลักษณะด้วย

### 3.1.2.3 เครื่องกัดอัตโนมัติ

เครื่องกัดอัตโนมัติที่ใช้เชื่อมในครั้งนี ชื่อ Eumach LMC-1000 ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องกัดอัตโนมัติ Eumach LMC-1000

## 3.2 กระบวนการเชื่อม FSJ และตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

กระบวนการเชื่อม FSJ แสดงดังรูป 3.13 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานการทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (Machining Center) ในการเชื่อม โดยจะใช้โปรแกรมการเชื่อมในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ อันได้แก่ ความเร็วรอบของเครื่องมือเชื่อม อัตราป้อน ระยะเวลากดแช่ และระยะความลึกในการเชื่อม หลังจากเตรียมในส่วนของการโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการติดตั้งเครื่องมือเชื่อมพร้อมด้วยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเข้ากับ Table ของเครื่องจักร เมื่อเตรียมองค์ประกอบของการเชื่อมพร้อมแล้ว ต่อจากนั้น ก็จะเริ่มต้นทำการเชื่อม FSJ แสดงดังรูป 3.14 ทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกลออลูมิเนียมผสม AA1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 แสดงดังตารางที่ 3.3 อันประกอบด้วย

3.2.1 เครื่องมือเชื่อม T1 T2 T3 T4 T5

3.2.2 ความเร็วรอบตัวกวนที่ 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที

3.2.3 อัตราป้อน 4 6 8 10 มม./นาที

### 3.2.4 เวลาในการกดแช่ที่ 3 วินาที

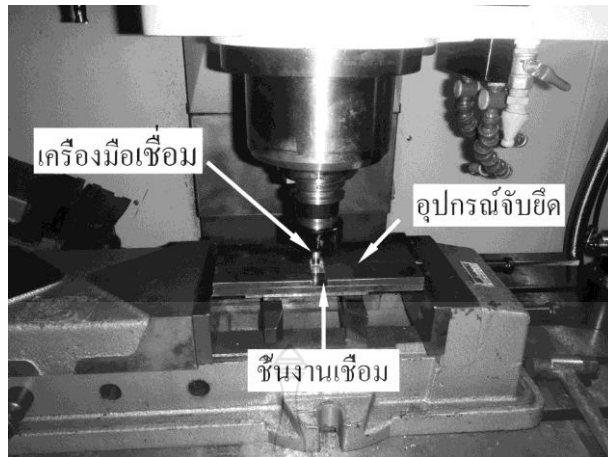
ตารางที่ 3.3 สภาวะการเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

ความเร็วรอบ	ความเร็วป้อน, มม./นาที																			
	4					6					8					10				
รอบ/นาที	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
2500	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
3000	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
3500	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
4000	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5

สาเหตุที่เลือกความเร็วรอบของตัวกวนที่ 2500–4000 รอบ/นาที เนื่องจากศึกษางานวิจัยที่ลักษณะเดียวกันคือ อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อความแข็งแรงรอยต่อของอลูมิเนียมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่พบว่าความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาทีเป็นสภาวะที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 1980 นิวตัน หรือ 95 % ของความต้านแรงดึงของอลูมิเนียมผสมเกรด 1100 [7]



รูปที่ 3.13 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดแบบรอยต่อเกย (LAP JOINT)



รูปที่ 3.14 การเชื่อมอลูมิเนียมผสม AA1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 แบบรอยต่อเกย

### 3.3 การทดสอบรอยเชื่อม

#### 3.3.1 การทดสอบกลสมบัติของรอยเชื่อม

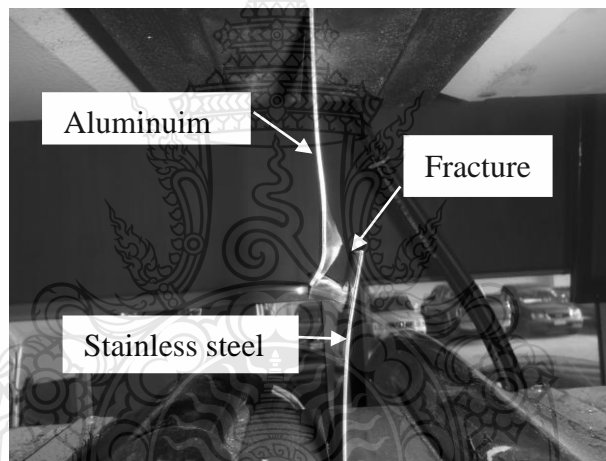
เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ ชิ้นงานเชื่อมจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.15 จะถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน การเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน JIS [6] และทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง แสดงในรูปที่ 3.16 โดยทำการดึงรอยเชื่อมในลักษณะแรงเฉือน จนแนวเชื่อมขาดหรือหนีออกจากกันแสดงดังรูป 3.17 และวัดค่าแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 3.15 ชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงดึง

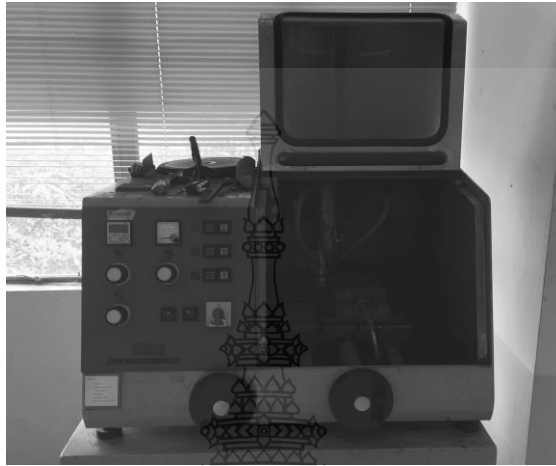


รูปที่ 3.17 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานเชื่อมหลังทดสอบแรงดึง

### 3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม (Microstructure)

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) [7] และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานตรวจสอบจะถูกเตรียมเพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมมาตัดผ่ากลางรอยเชื่อมด้วยเครื่องตัดชิ้นงานดังรูปที่ 3.18 นำชิ้นงานเชื่อมที่ตัดเตรียมไว้ไปทำเรือน (Mounting) หุ้มชิ้นงานด้วยอัดเบกไลต์ (Bagelite) ด้วยเครื่องอัดเบกไลต์ ดังรูปที่ 3.19 ทั้งนี้ก็เพื่อความสะดวกในการจับถือและการเตรียมชิ้นงานในขั้นตอนการขัดดูโครงสร้างก็

จะสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น การทำเรื่อนเป็นขั้นตอนง่ายๆเพียงวางชิ้นงานในเครื่องดังรูปที่ 3.20 แล้วตวงผงเบเกไลท์บวกรเรซิน จำนวน 60 มล. ปิดฝาแล้วเปิดเครื่องทิ้งไว้ในเวลา 15 นาที ก็นำชิ้นงานออกจากเครื่อง ทิ้งไว้ให้เย็น



รูปที่ 3.18 เครื่องตัดเตรียมชิ้นงาน



รูปที่ 3.19 เรื่อน (Mounting) หุ้มชิ้นงาน



รูปที่ 3.20 เครื่องอัลตราโซนิก (Bakelite)

ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์ จึงต้องขัดผิวชิ้นงานให้เรียบ เพื่อให้ผิวชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งโฟกัสได้ จากนั้นจะนำไปขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) ที่มีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Almina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) การขัดด้วยผงขัดนี้ จะทำบนเครื่องที่แสดงในรูปที่ 3.21 ที่มีจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมันเงาและต้องตามด้วยการกัดกรด



รูปที่ 3.21 เครื่องขัดผิวโครมสร้าง

ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะนำไปกัดด้วยน้ำยา (Etching) Al 1 มล. ผสมด้วยน้ำกลั่น 100 มล. และกรดไฮโดรฟลูออริก (40 %) 0.5 มล. ในเวลา 10-60 วินาที โดยน้ำยาจะกัดตามขอบเกรนรุนแรงกว่าส่วนอื่นเนื่องจากขอบเกรนเป็นส่วนที่บกพร่องที่สุด [9] ชิ้นตรวจสอบที่ถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้วไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light Microscope) ดังแสดงในรูปที่ 3.22 โดยวางชิ้นตรวจสอบให้อยู่ตรงกลางบริเวณที่แสงผ่านและให้ลำกล้องเลื่อนมาอยู่ใกล้ชิ้นตรวจสอบมากที่สุด ลำแสงไฟที่ส่องผ่านตกกระทบกับผิวชิ้นทดสอบจะสะท้อนผ่านเลนส์วัตถุและเลนส์ตาของกล้อง ที่บริเวณขอบเกรนจะเห็นเป็นสีดำ (มืด) ขณะที่เนื้อเกรนเป็นสีเหลือง (สว่าง) แล้วทำการบันทึกผล เพื่อ



รูปที่ 3.22 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)



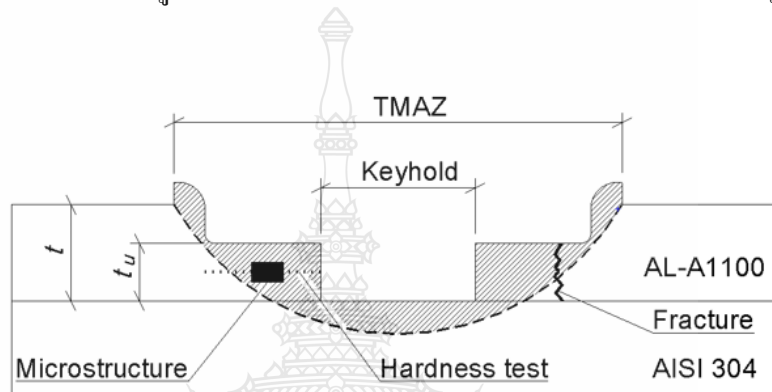
รูปที่ 3.23 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด



ใช้ประกอบในการวิเคราะห์เปรียบเทียบพื้นที่ที่เกิด การเชื่อมยึดต่อไปและตรวจสอบ โครงสร้างด้วย กล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป แบบส่องกราดรูปที่ 3.23

### 3.3.3 การตรวจสอบความแข็งของรอยเชื่อม

ทำการทดสอบหาค่าความแข็งที่บริเวณรอยเชื่อมได้บ่าเครื่องมือเชื่อม ด้วยเครื่อง ทดสอบความแข็งด้วยแรงกด (Load) 100 กรัม โดยระบุตำแหน่งที่ทำการกดที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณ รอยเชื่อมได้บ่าเครื่องมือเชื่อม ดังรูปที่ 3.24 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 ตำแหน่งการกดทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

## บทที่ 4

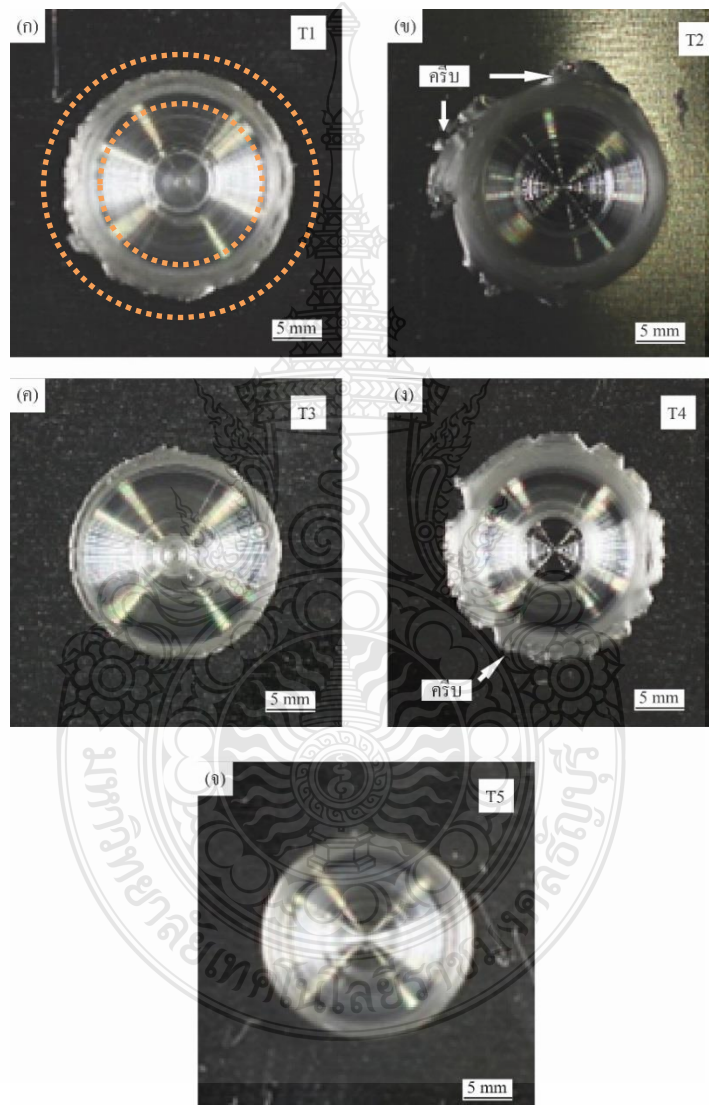
### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

การศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานกวนจุด (FSSW) ระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาตัวแปรการเชื่อมซึ่งประกอบด้วย ลักษณะรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบคือ เครื่องมือเชื่อม T1 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของบ่าแบนเรียบ เครื่องมือเชื่อม T2 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของบ่าเรียบเอียงออก เครื่องมือเชื่อม T3 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของบ่าเรียบเอียงเข้าด้านใน เครื่องมือเชื่อม T4 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของโค้งนูนออกด้านนอก และเครื่องมือเชื่อม T5 เป็นเครื่องมือเชื่อมลักษณะของโค้งเว้าเข้าด้านใน ดังแสดงในรูปที่ 3.5-3.9 ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที และความเร็วป้อน 4 6 8 10 มม./นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) วัดความหนา รอยเชื่อมด้านล่างของบ่าเครื่องมือ และทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Test) ทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแนวการพังทลาย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด แล้วนำมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดผลการเปรียบเทียบตามหัวข้อดังนี้

#### 4.1 ผลกระทบของเครื่องมือในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม

ทำการเปรียบเทียบลักษณะของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงของบ่าเครื่องมือเชื่อมแตกต่างกัน ในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดทำการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียม AA1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความหนา 1 มม. ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนโดยทำการเปรียบเทียบลักษณะของรอยเชื่อม ที่เชื่อมความเร็ว 8 มม./นาที และความเร็วรอบในการเชื่อมที่ 3000 รอบ/นาที ระยะเวลาคดแซ่ที่บริเวณอินเทอร์เฟซคงที่ 3 วินาที โดยใช้เครื่องมือเชื่อม T1 ที่มีลักษณะบ่าแบนเรียบ เครื่องมือเชื่อม T2 ที่มีลักษณะบ่าเอียงออก เครื่องมือเชื่อม T3 ที่มีลักษณะเอียงเข้า เครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีลักษณะบ่าโค้งนูนออกและเครื่องมือเชื่อม T5 ที่มีลักษณะบ่าโค้งเว้าเข้าแสดงดังรูปที่ 4.1 จากการทดลองพบว่า ที่ขอบของรอยเชื่อมจะมีอลูมิเนียมไหลออกมาเป็นวงกลมรอบรอยเชื่อม รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1 ดังรูป 4.1 อลูมิเนียมที่ไหลออกมารอบขอบของรอยเชื่อม เป็นวงกลม มีความสม่ำเสมอรอบรอยเชื่อม และขอบอลูมิเนียมที่ไหลออกมาเป็นครีบลึกๆ คล้ายฟันเลื่อย ปริมาณอลูมิเนียมที่ไหลออกมารอบรอยเชื่อมมีปริมาณมากกว่ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วย

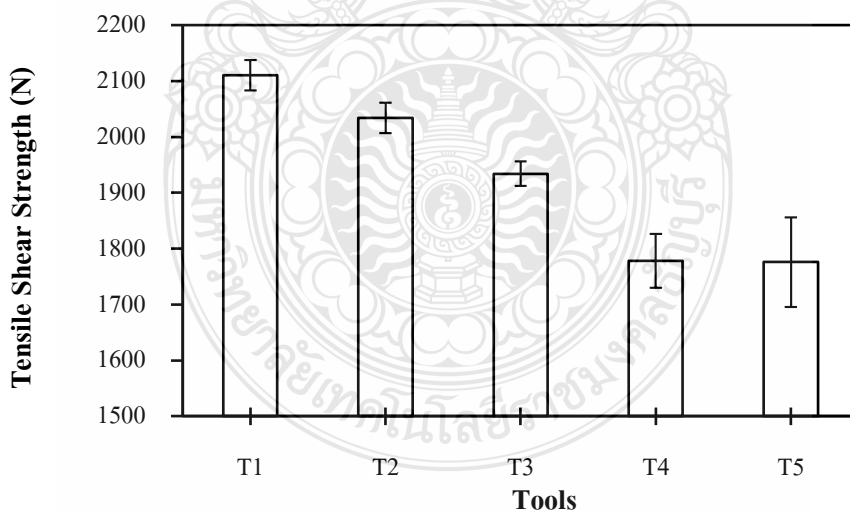
เครื่องมือเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงดิ่งเหนือสูงสุดดังรูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับ รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อมอื่นๆ รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 ปริมาณอลูมิเนียมที่ไหลออกมารอบรอยเชื่อมเป็นวงกลมไม่สม่ำเสมอ มีครีบขนาดใหญ่ของอลูมิเนียมเกิดขึ้นแต่ไม่รอบ รอยเชื่อมดังรูปที่ 4.1 ข รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T3 ปริมาณอลูมิเนียมที่ไหลออกมารอบ รอยเชื่อม



รูปที่ 4.1 ลักษณะของรอยเชื่อมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วย ก. เครื่องมือเชื่อม T1 ข. เครื่องมือเชื่อม T2 ค. เครื่องมือเชื่อม T3 ง. เครื่องมือเชื่อม T4 จ. เครื่องมือเชื่อม T5

เป็นวงกลมความหนาของขอบอลูมิเนียมที่ไหลออกมาน้อยที่สุดเป็นเพราะลักษณะบ่าที่เอียงเข้าดังรูปที่ 4.1ค รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ปริมาณอลูมิเนียมที่ไหลออกมารอบรอยเชื่อมเป็นวงกลมไม่สม่ำเสมอ เกิดครีบขนาดใหญ่ของอลูมิเนียมที่ไหลออกมารอบขอบรอยเชื่อมดังรูปที่ 4.1ง และรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T5 ปริมาณอลูมิเนียมที่ไหลออกมารอบรอยเชื่อมเป็นวงกลมมีความสม่ำเสมอ ที่ขอบของอลูมิเนียมเรียบไม่มีครีบเกิดขึ้นดังรูปที่ 4.1จ

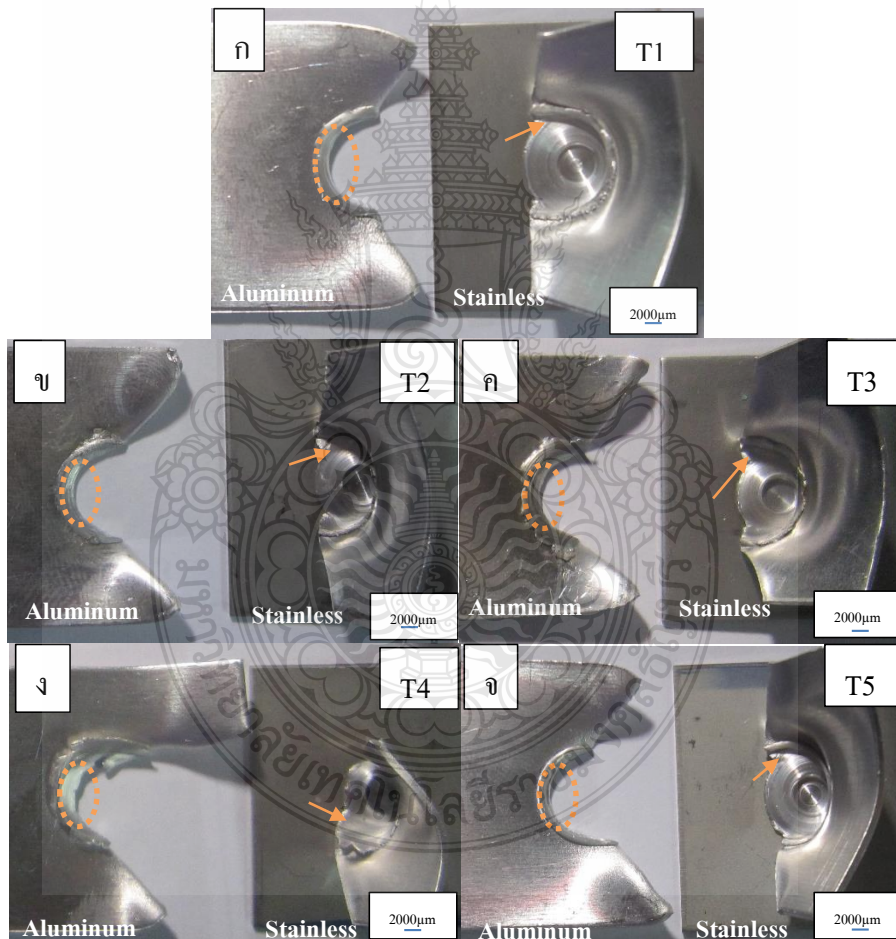
เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของเครื่องมือเชื่อมที่มีลักษณะของบ่าเครื่องมือเชื่อมแตกต่างกันที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนพบว่าลักษณะรูปทรงของบ่าเครื่องมือส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เครื่องมือในการเชื่อม T1 ที่มีลักษณะเป็นบ่าเรียบให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 2110 นิวตัน รองลงมาเป็นเครื่องมือในการเชื่อม T2 ลักษณะเป็นบ่าเอียงออกให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 2034 นิวตัน เครื่องมือในการเชื่อมที่ T3 ลักษณะเป็นบ่าเอียงเข้าให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 1934 นิวตัน เครื่องมือในการเชื่อมที่ T4 ลักษณะเป็นบ่าโค้งนูนออกให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 1778 นิวตัน และเครื่องมือในการเชื่อมที่ T5 ลักษณะเป็นบ่าโค้งเว้าเข้าให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเท่ากับ 1776.5 นิวตัน ดังนั้นรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1 ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด (Tensile Shear Strength) เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะเครื่องมือ แบบอื่นๆ



รูปที่ 4.2 ความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด (Tensile Shear Strength) ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือเชื่อม T1–T5

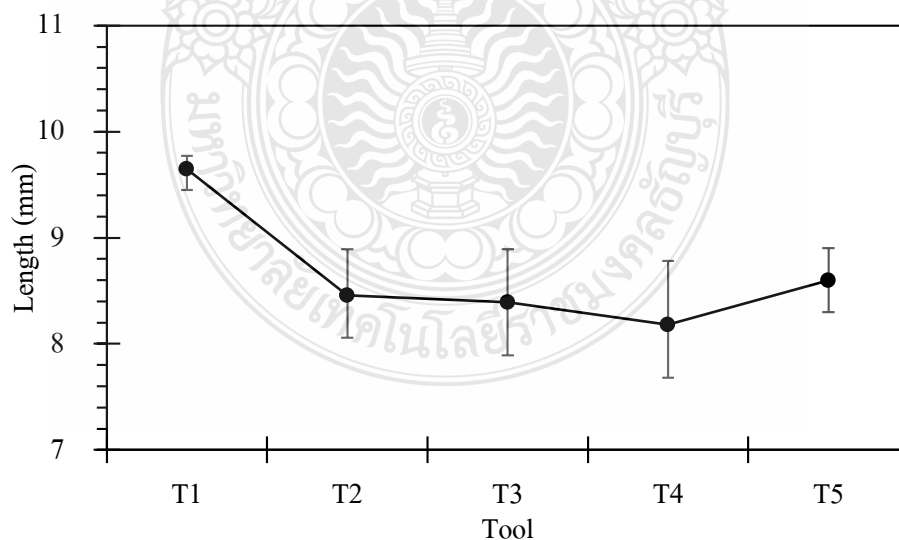
จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด AA1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความหนา 1 มม. ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดเครื่องมือในการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมควรมีลักษณะน่าเปรียบ

เปรียบเทียบลักษณะของการพังทลายของรอยเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ด้วยเครื่องมือเชื่อมที่มีลักษณะน่าแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าการพังทลายของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1-T5 เกิดที่พื้นที่รอยเชื่อมอลูมิเนียมบริเวณใต้เครื่องมือเชื่อม ไม่ได้เกิดที่พื้นที่รอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงดังรูป 4.3



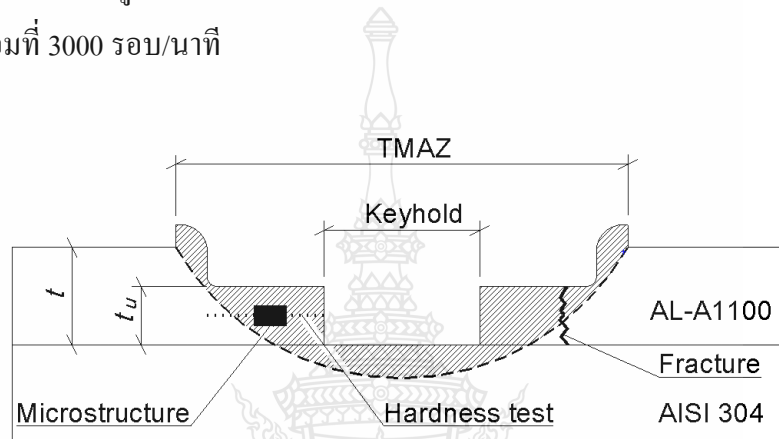
รูปที่ 4.3 ลักษณะของการพังทลายของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วย ก.เครื่องมือเชื่อม T1 ข.เครื่องมือเชื่อม T2 ค.เครื่องมือเชื่อม T3 ง.เครื่องมือเชื่อม T4 จ.เครื่องมือเชื่อม T5

การพังทลายของรอยเชื่อม ที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1 เป็นรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงสูงสุดดังรูป 4.3ก. เป็นลักษณะการพังทลายที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูง การพังทลายจะเกิดที่อลูมิเนียมบริเวณขอบของรอยเชื่อม เมื่อวัฏระยะของรอยเชื่อมที่พังทลาย บริเวณด้านบนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ตามแนวการดึง แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่ระยะของรอยเชื่อมที่พังทลายบริเวณใต้บาทที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.65 มม. เมื่อเทียบกับเครื่องมือเชื่อมอื่นๆ ให้ความแข็งแรงดึงเฉือนมีค่าสูงสุด และพบว่าระยะของรอยเชื่อมที่พังทลายมีค่าลดลงจะทำให้ความแข็งแรงดึงเฉือนลดลง เห็นได้จากเมื่อเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 การพังทลายของรอยเชื่อมจะเกิดที่อลูมิเนียมไม่ชิดขอบรอยเชื่อมดังรูป 4.3ข ทำให้ระยะของรอยเชื่อมที่พังทลายตามแนวการดึงเท่ากับ 8.455 มม. ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเฉือนลดลงเหมือนกับการพังทลายของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T3 และ T4 ดังรูป 4.3ค-ง การพังทลายจะเกิดที่อลูมิเนียมบริเวณใต้บาทเครื่องมือเชื่อมไม่ชิดขอบรอยเชื่อมทำให้ระยะรอยเชื่อมที่พังทลายที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T3 ตามแนวการดึงเท่ากับ 8.39 มม. ระยะของรอยเชื่อมที่พังทลายที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ตามแนวการดึงเท่ากับ 8.18 มม. แต่การพังทลายของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T5 จะเกิดชิดขอบรอยเชื่อม ทำให้ระยะของรอยเชื่อมที่พังทลายที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T5 จะเพิ่มขึ้น เท่ากับ 8.60 มม. จากผลการทดลองพบว่า ระยะของรอยเชื่อมที่พังทลายจะส่งผลกับความแข็งแรงดึงเฉือน ระยะของรอยเชื่อมที่พังทลายก็จะลดลงจะทำให้ความแข็งแรงดึงเฉือนลดลง



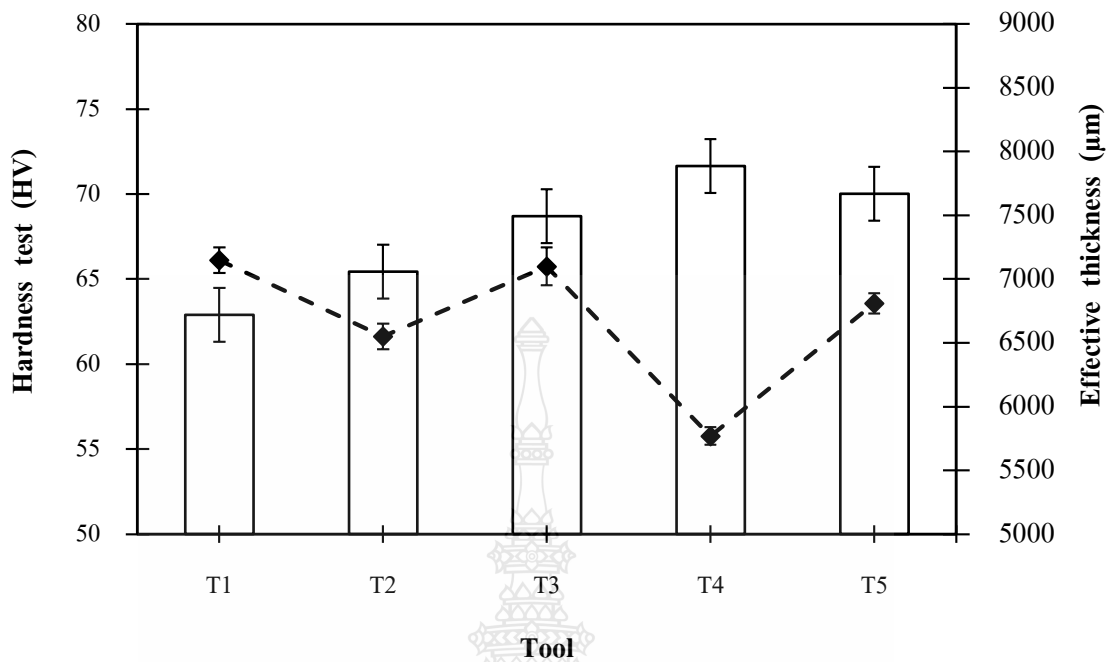
รูปที่ 4.4 ระยะการพังทลายของรอยเชื่อมด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมของเครื่องมือ T1-T5

จากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการพังทลายของชิ้นงานจากการทดสอบแรงดึงเนื่องพบว่าเกิดการพังทลายที่อลูมิเนียมบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อน (TMAZ) ตรงด้านล่างของของบ่าเครื่องมือ ( $t_u$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จึงได้ทำการวัดความสูงของพื้นที่ด้านล่างบ่าเครื่องมือ ความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาคบริเวณดังกล่าวเพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของเครื่องมือเชื่อมที่มีลักษณะของบ่าเครื่องมือเชื่อมแตกต่างกันที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเนื่อง โดยทำการเปรียบเทียบความแข็งและความหนาของอลูมิเนียมใต้บ่าของรอยเชื่อม ที่เชื่อมความเร็วเชื่อม 8 มม./นาทิจ และความเร็วรอบในการเชื่อมที่ 3000 รอบ/นาทิจ



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และการวัดความสูงของอลูมิเนียมที่ด้านล่างของบ่าเครื่องมือ ( $t_u$ )

ผลการเปรียบเทียบความแข็งของและความหนาบริเวณอลูมิเนียมบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม ที่เกิดจากการเชื่อมของเครื่องมือเชื่อมที่มีลักษณะบ่าเครื่องมือที่แตกต่างกันผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเครื่องมือที่มีบ่าเรียบหรือ T1 มีรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องสูงสุดพบว่ามีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยบริเวณใต้บ่าเครื่องมือต่ำสุดที่ 62.9 วิกเกอร์สเกล แต่เมื่อเปลี่ยนเครื่องมือในการเชื่อมเป็น T2 ความแข็งแรงบริเวณใต้บ่าเครื่องมือมีค่าสูงขึ้นเป็น 65.45 วิกเกอร์สเกล เครื่องมือในการเชื่อมเป็น T3 ความแข็งแรงบริเวณใต้บ่าเครื่องมือมีค่าสูงขึ้นเป็น 68.7 วิกเกอร์สเกล เครื่องมือในการเชื่อมเป็น T4 ความแข็งแรงบริเวณใต้บ่าเครื่องมือมีค่าสูงขึ้นเป็น 71.66 วิกเกอร์สเกล ซึ่งจะเห็นว่าค่าความแข็งแรงบริเวณใต้บ่าเครื่องมือมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเนื่องลดลง และเครื่องมือในการเชื่อมเป็น T5 ความแข็งแรงบริเวณใต้บ่าเครื่องมือมีค่าลดลงเป็น 70.1 วิกเกอร์สเกล ดังนั้นเครื่องมือเชื่อมที่ T1 ให้ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องสูงเนื่องจากบริเวณบ่ากวนมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่าเครื่องมือเชื่อม T2-T5 เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่าจึงเกิดความร้อนจากการเสียดทานน้อยกว่าส่งผลทำให้ความแข็งแรงเฉลี่ยของรอยเชื่อมบริเวณใต้บ่าของรอยเชื่อมต่ำสุดทำให้ความแข็งแรงดึงเนื่องมีค่าสูงสุด



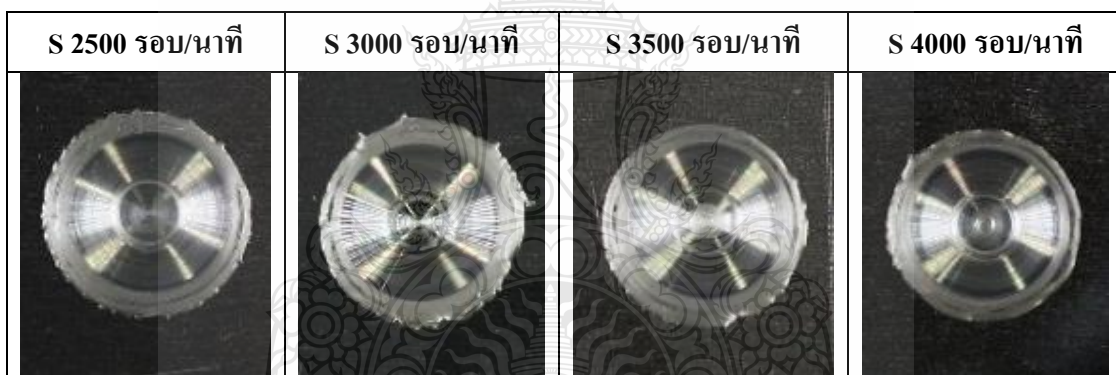
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของ Hardness กับ Feeds และ Effective Thickness ( $t_e$ ) ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือ T1-T5

เมื่อเปรียบเทียบความหนาบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อมพบว่าเครื่องมือเชื่อม T1 ที่มีความแข็งแรงถึงสูงสุด พบว่าความหนาใต้บ่าเครื่องมือเท่ากับ 7150 ไมโครเมตร ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยของอลูมิเนียมบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อมสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือเชื่อม T2 มีความหนาใต้บ่าเครื่องมือเท่ากับ 6550 ไมโครเมตร เครื่องมือเชื่อม T3 มีความหนาใต้บ่าเครื่องมือเท่ากับ 7100 ไมโครเมตร เครื่องมือเชื่อม T4 พบว่าความหนาใต้บ่าเครื่องมือเท่ากับ 5770 ไมโครเมตร จะเห็นว่าความหนาใต้บ่าเครื่องมือเชื่อมลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงถึงเดือนลดลง จากการทดลองพบว่าความแข็งของรอยเชื่อมบริเวณใต้บ่ามีอิทธิพลต่อความแข็งแรงถึงเดือนเครื่องมือเชื่อม T1 มีลักษณะบ่าแบนเรียบมีพื้นที่ผิวบริเวณบ่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือเชื่อมอื่น ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดทานต่ำสุด จะส่งผลให้ความแข็งของรอยเชื่อมต่ำสุด จึงทำให้มีความแข็งแรงถึงเดือนต่ำสุดเพราะการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างพื้นที่ผิวบ่าเครื่องมือและ โลหะเชื่อม ส่งผลทำให้ความหนาอลูมิเนียมด้านล่างบ่าเครื่องมือที่ผิวสัมผัสรอยต่อเกิดลดลง และมีผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกำจัดอลูมิเนียมออกจากผิวสัมผัสซึ่งจะลดการรวมตัวของโลหะเชื่อม



## 4.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม

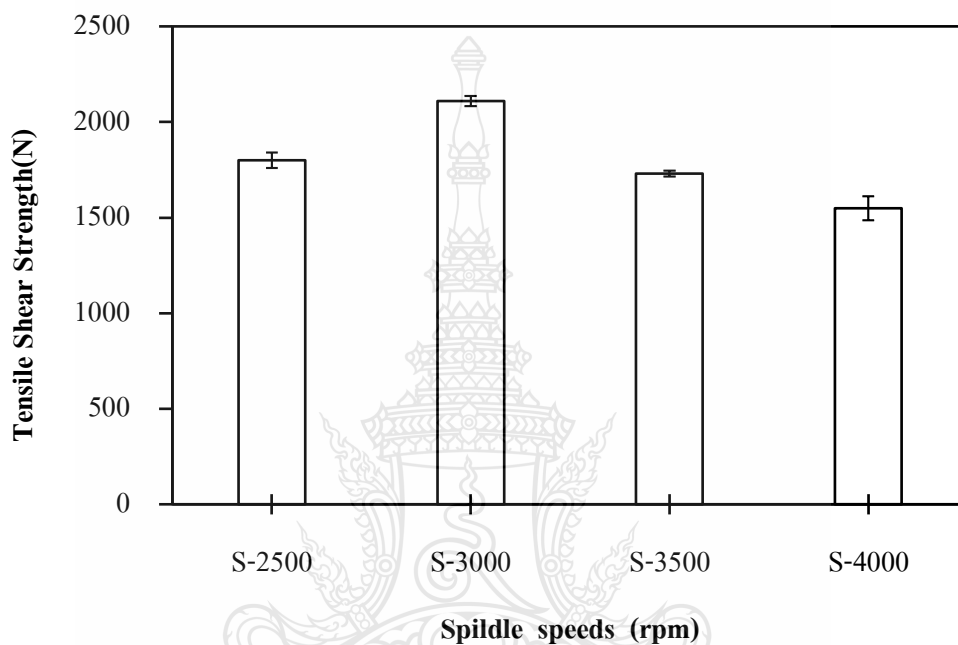
การเปรียบเทียบรูปแบบของเครื่องมือในการเชื่อมในการเชื่อมที่ส่งผลต่อแรงดึงเดือนในหัวข้อที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบความแข็งของและความหนาบริเวณอูมิเนียมบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อมดังนั้นจึงนำตัวแปลเครื่องมือเชื่อม T1 และความเร็วป้อนที่ 8 มม./นาที เป็นค่าคงที่เพื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอูมิเนียมเกรด 1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ความเร็วรอบ 2500 3000 3500 และ 4000 รอบ/นาที พบว่าที่บริเวณรอยเชื่อมจะมีอูมิเนียมไหลออกมาเป็นขอบวงกลมรอบรอยเชื่อม อูมิเนียมที่ล้นออกมาบริเวณขอบรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที จะมีครีบเล็กๆการกระจายตัวสม่ำเสมอรอบรอยเชื่อม เมื่อความเร็วรอบการเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 3000 รอบ/นาที ครีบเล็กๆรอบขอบรอยเชื่อมจะใหญ่ขึ้น อยู่ห่างกันมากขึ้น อูมิเนียมที่ไหลออกมามากขึ้น เมื่อความเร็วรอบเป็น 3500 และ 4000 รอบ/นาที รอยครีบเล็กๆจะหายไปและขอบของอูมิเนียมที่ไหลออกมาจะเรียบขึ้นที่ความเร็วรอบการเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะของรอยเชื่อมที่เชื่อมความเร็วรอบ 2500 3000 3500 และ 4000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือเชื่อม T1

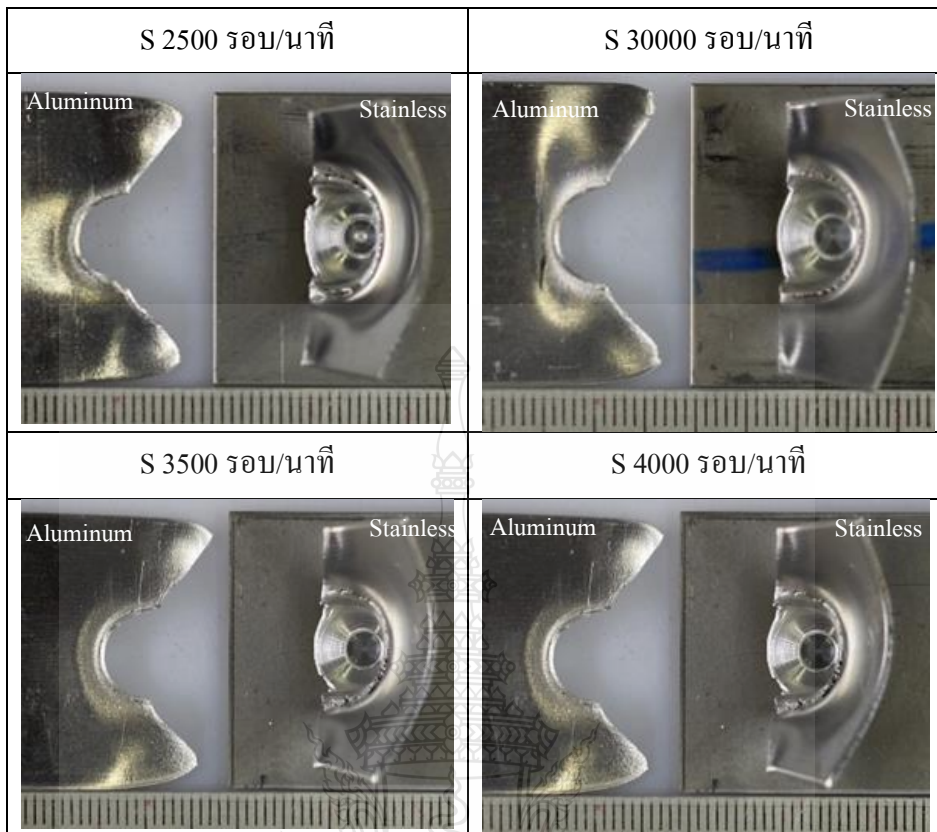
ผลการทดสอบแรงดึงเดือน แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าความเร็วรอบในการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม จากการเปรียบเทียบความเร็วรอบในการเชื่อมพบว่าที่ความเร็วป้อน 3000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดที่ 2110 นิวตัน เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะความแข็งของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนเสียดทานเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการเชื่อมสูงขึ้นเป็น 3500 รอบ/นาที และ 4000 รอบ/นาที ค่าความแข็งแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่าลดลงตามลำดับที่ความเร็วป้อน 4000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนต่ำสุดที่ 1549.5 นิวตัน สำหรับการเชื่อม

ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนลดลงมีค่าเท่ากับ 1860 นิวตัน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ S.Lathabai [28] ได้ทำการเชื่อมเสียดทานแบบจุ่มรอยต่อของอลูมิเนียมผสม Al-Mg-Si พบว่าความแข็งแรงดึงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มจาก 1000 รอบ/นาทีเป็น 3000 รอบ/นาที และความแข็งแรงดึงเฉือนมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น



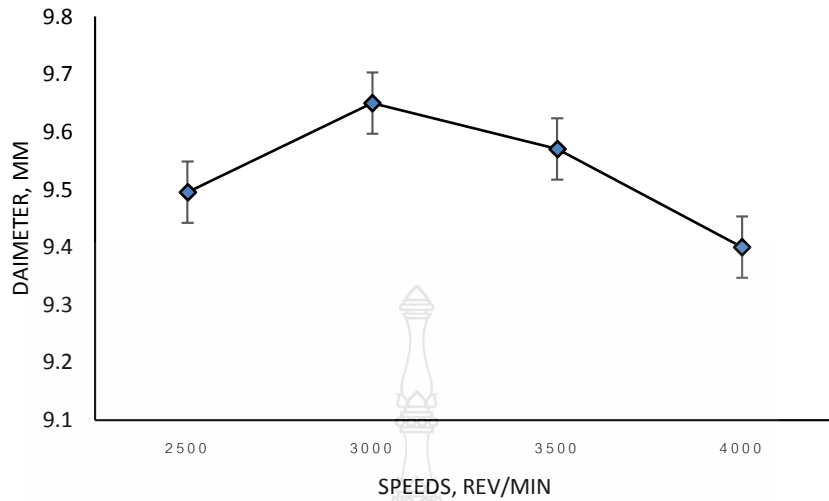
รูปที่ 4.8 ความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด (Tensile Shear Strength) ของรอยเชื่อมที่ความเร็วป้อน 8 มม./นาที เครื่องมือเชื่อม T1 ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500-4000 รอบ/นาที

การพังทลายของรอยเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานแบบจุ่มระหว่างอลูมิเนียมเกรดผสม 1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ของเครื่องมือเชื่อมที่มีลักษณะเรียบเชื่อมด้วยความเร็วป้อน 8 มม./นาที ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500 3000 3500 และ 4000 รอบ/นาที พบว่าการพังทลายของรอยเชื่อมเกิดที่อลูมิเนียมบริเวณใต้ปาเครื่องมือเชื่อม T1 ไม่ได้เกิดที่บริเวณอินเทอร์เฟซ แสดงว่าเป็นรอยเชื่อมมีความแข็งแรงแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าการพังทลายของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที มีความแข็งแรงสูงสุด พบว่าการพังทลายจะเกิดขีดขอบของรอยเชื่อม เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นการพังทลายจะเกิดห่างจากขอบรอยเชื่อมเข้ามาในเนื้ออลูมิเนียมบริเวณใต้ปารอยเชื่อมมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึงเฉือนลดลง

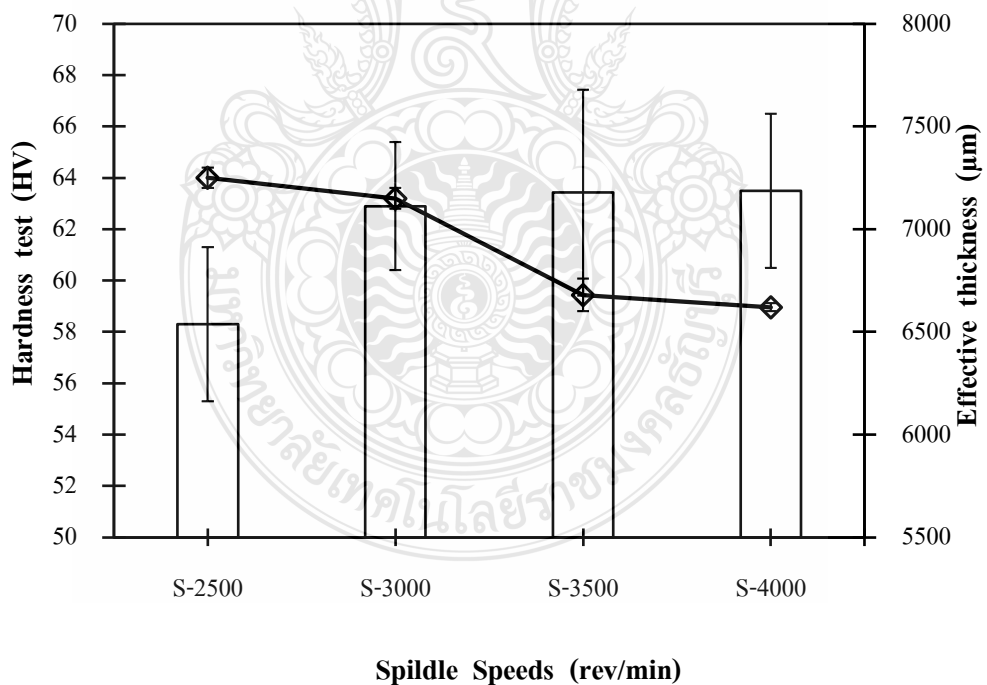


รูปที่ 4.9 ลักษณะของการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือ T1

เมื่อวัดขนาดของรอยพังทลายของรอยเชื่อมด้านบนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1 แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ระยะของรอยพังทลายตามแนวตั้งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.65 มม. เมื่อความเร็วรอบการเชื่อมเพิ่มขึ้นระยะของรอยพังทลายตามแนวตั้งจะลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลง และจะมีค่าต่ำสุดที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที ระยะของรอยพังทลายเท่ากับ 9.40 มม. เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนมีค่าต่ำสุด ความกว้างของรอยพังทลาย เมื่อเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะของรอยพังทลายจะมีเท่ากับ 9.495 มม. ซึ่งต่ำกว่ารอยพังทลายที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลง



รูปที่ 4.10 ระยะการพังทลายของรอยเชื่อมด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมของเครื่องมือ T1 ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 3000 3500 และ 4000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งกับความหนา ( $t_e$ ) ของรอยเชื่อมที่ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ของเครื่องมือ T1 ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที

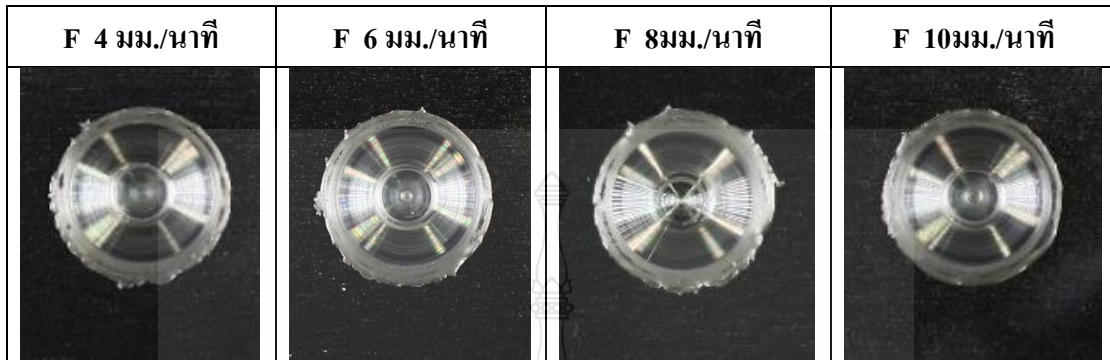
เปรียบเทียบความแข็งและความหนาของอลูมิเนียมบริเวณใต้ปาเครื่องมือเชื่อม ที่เกิดจากการเชื่อมด้วยเครื่องมือที่ลักษณะปาเครื่องมือเรียบ ดังรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งและความหนา ( $t_p$ ) ของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 8 มม./นาที พบว่าความเร็วรอบในการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งและความหนาของอลูมิเนียมบริเวณใต้ปาเครื่องมือเชื่อม จากการเปรียบเทียบความเร็วรอบในการเชื่อมพบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลง ที่ความเร็วป้อน 3000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุด มีความแข็งเฉลี่ยบริเวณใต้ปาเครื่องมือที่ 62.9 วิกเกอร์สเกล เมื่อความเร็วรอบการเชื่อมเพิ่มขึ้นความแข็งจะเพิ่มขึ้น เป็นเช่นนี้เพราะความร้อนเสียดทานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลง ที่ความเร็วรอบเป็น 3500 รอบ/นาที และ 4000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณใต้ปาเครื่องมือที่ 63.42 วิกเกอร์สเกล และ 63.5 วิกเกอร์สเกล ตามลำดับ จากความแข็งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมลดลง แต่ที่ความเร็วป้อน 2500 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณใต้ปาเครื่องมือต่ำสุดที่ 58.3 วิกเกอร์สเกล

ความหนาของอลูมิเนียมบริเวณใต้ปาเครื่องมือเชื่อมเมื่อเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1 พบว่าความหนาใต้ปาเครื่องมือมีค่าลดลง เมื่อความเร็วรอบของการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลงจากรูปที่ 4.4 พบว่าความเร็วป้อน 3000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดมีค่าความหนาของอลูมิเนียมใต้ปาเครื่องมือเท่ากับ 7150 ไมโครเมตร เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความหนาของอลูมิเนียมจะลดลง ที่ความเร็วป้อน 3500 รอบ/นาที และ 4000 รอบ/นาที มีค่าความหนาใต้ปาเครื่องมือเท่ากับ 6680 ไมโครเมตร และเท่ากับ 6620 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลงและมีค่าต่ำสุด

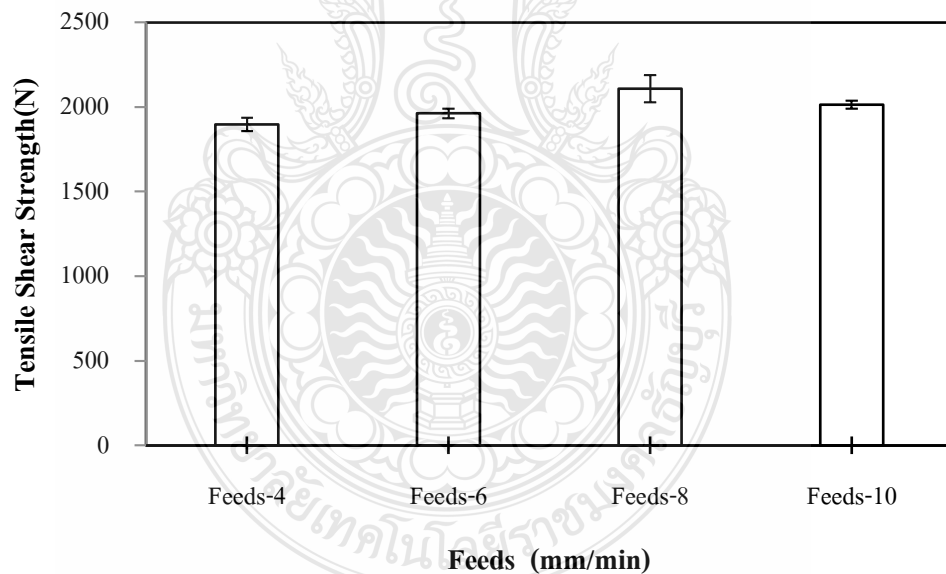
#### 4.3 ผลกระทบของความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม

การเปรียบเทียบรูปแบบของเครื่องมือในการเชื่อมในการเชื่อมที่ส่งผลต่อแรงดึงเดือนในหัวข้อที่ 4.1-4.2 พบว่าเครื่องมือในการเชื่อม T1 ให้ค่ารับแรงดึงเดือนสูงสุดดังนั้นจึงนำตัวแปรเครื่องมือเชื่อม T1 ที่มีลักษณะปาเครื่องมือเรียบ เชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ระยะเวลา கடແໜ່ທີ່บริเวณอินเทอร์เฟซคงที่ 3 วินาทีและความเร็วป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที ตามลำดับ มาเปรียบเทียบลักษณะรอยเชื่อม แสดงดังรูป 4.12 จากลักษณะของรอยเชื่อมจะพบว่าที่รอบรอยเชื่อมจะมีอลูมิเนียมไหลออกมาเป็นขอบวงกลมรอบรอยเชื่อม อลูมิเนียมที่ไหลออกมาบริเวณขอบรอยเชื่อม ที่เชื่อมด้วยความเร็วป้อน 8 มม./นาที เป็นรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุด เมื่อที่ความเร็วป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 10 มม./นาที ครีบของอลูมิเนียมที่ไหลออกมาหายไปเมื่อความเร็วป้อน 6 มม./นาที และ 4

มม./นาที การกระจายตัวครีปของอลูมิเนียมรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ และครีปมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อความเร็วเชื่อมลดลง



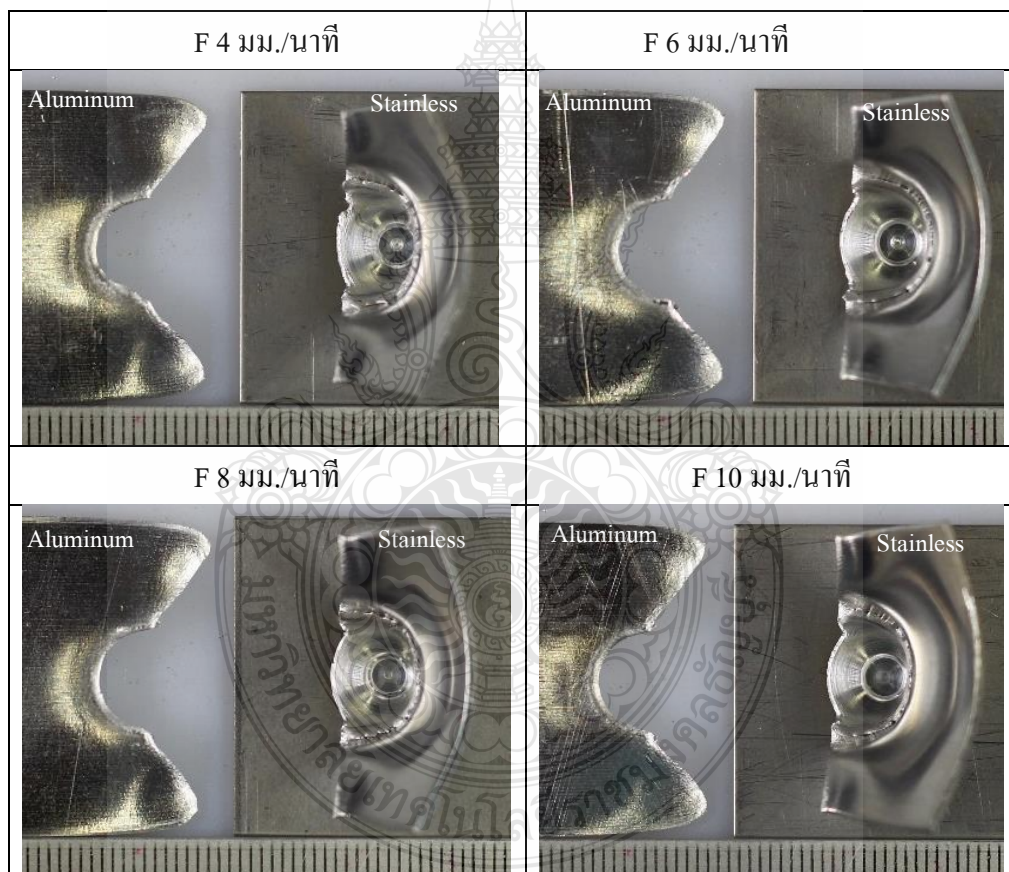
รูปที่ 4.12 ลักษณะของรอยเชื่อมที่เชื่อมความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที ของเครื่องมือ T1



รูปที่ 4.13 ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T1 ความเร็วรอบในการเชื่อม 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที

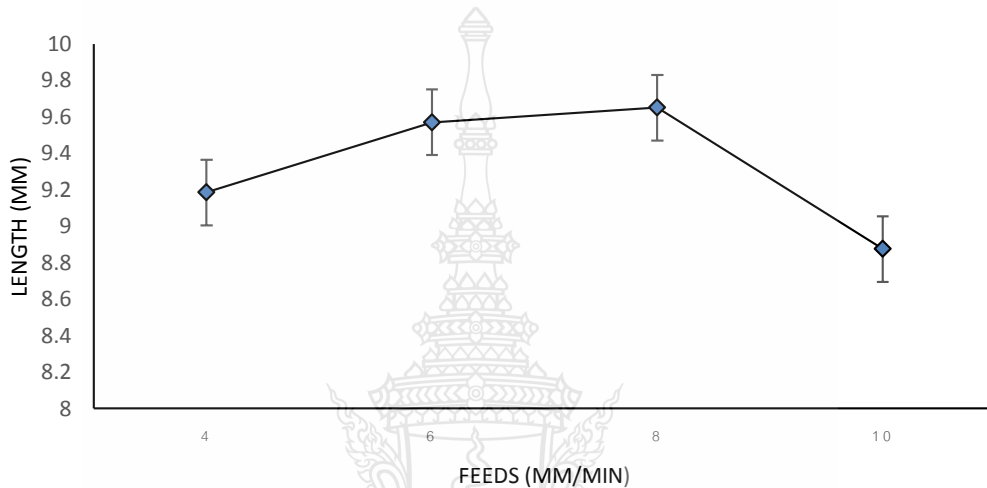
ผลการทดลองพบว่าความเร็วในการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.13 จากการเปรียบเทียบความเร็วเชื่อมของเครื่องมือเชื่อมที่ความเร็วป้อนที่ 8 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดที่ 2110 นิวตัน เมื่อความเร็วป้อนลดลงจะส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเฉือนจะลดลงและมีค่าต่ำสุดที่ความเร็วป้อนที่ 4 มม./นาที ให้ค่าในการรับแรงดึงต่ำสุดที่ 1896 นิวตัน

เมื่อพิจารณาลักษณะการพังทลายของรอยเชื่อม ที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อมที่มีปากแบนเรียบพบว่ารอยพังทลายรอยรอยเชื่อมที่ความเร็วป้อนที่ 4 6 8 และ 10 มม./นาที จะเกิดการพังทลายที่อลูมิเนียมบริเวณใต้ปากเครื่องมือเชื่อม ไม่ได้เกิดที่บริเวณอินเทอร์เฟซ แสดงว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรงอูมิเนียมบริเวณใต้ปากเครื่องมือเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ลักษณะของการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4 6 8 และ 10 มม./นาที ของเครื่องมือ T1

การพังทลายของรอยเชื่อมเกิดที่อลูมิเนียมบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม ไม่ได้เกิดที่บริเวณอินเทอร์เฟซ แสดงว่าเป็นรอยเชื่อมมีความแข็งแรง แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่า การพังทลายของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็ว 8 มม./นาที่ ที่ให้มีความแข็งแรงสูงสุด การพังทลายจะเกิดชิดขอบของรอยเชื่อม เมื่อความเร็วลดลงการพังทลายจะเกิดห่างจากขอบรอยเชื่อมเข้ามาในเนื้ออลูมิเนียมบริเวณใต้บ่า รอยเชื่อมมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงดิ่งเลื่อนลดลง



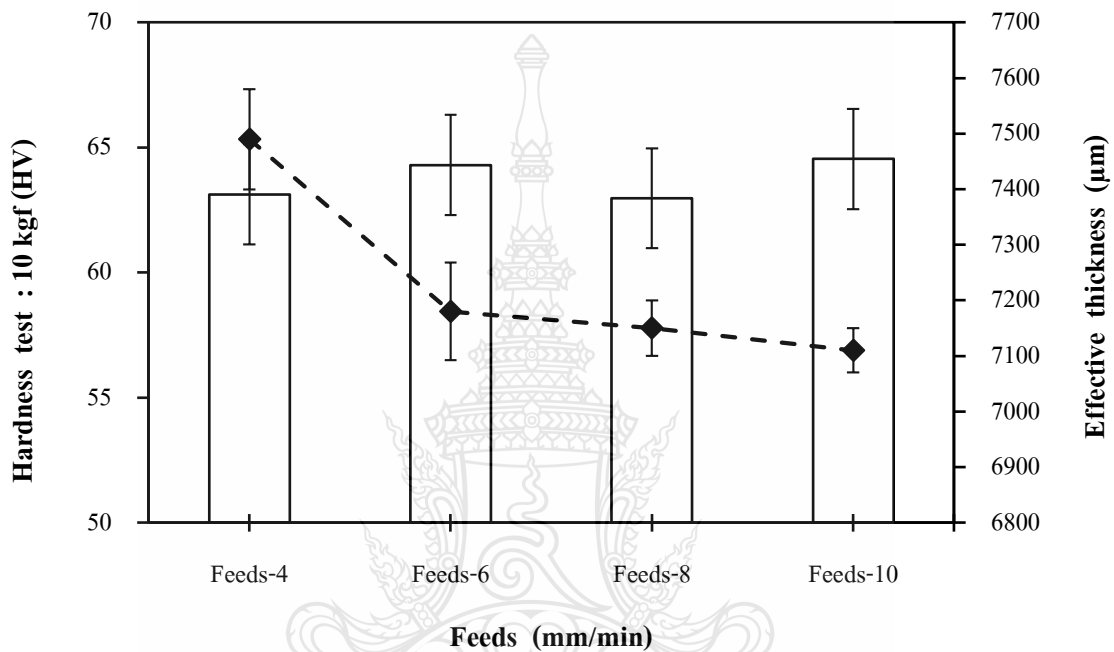
รูปที่ 4.15 ระยะการพังทลายของรอยเชื่อมด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมของเครื่องมือ T1 ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที่ ความเร็วป้อน 4 6 8 10 มม./นาที่

ระยะการพังทลายของการเชื่อมด้านบนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าการเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมเพิ่มเป็น 8 มม./นาที่ มีความระยะของรอยพังทลายสูงสุดเท่ากับ 9.65 มม. ส่งผลให้ความแข็งแรงดิ่งสูงสุด เมื่อความเร็วป้อนลดลง ระยะของรอยพังทลายลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงดิ่งเลื่อนลดลง

เปรียบเทียบความแข็งแรงและความหนาของอลูมิเนียมบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม ที่เกิดจากการเชื่อมด้วยเครื่องมือที่ลักษณะบ่าเครื่องมือเรียบ ดังรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงและความหนา ( $t_u$ ) ของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที่ของเครื่องมือ T1 ความเร็วป้อนของเครื่องมือเชื่อม 4-10 มม./นาที่ พบว่าความเร็วป้อนของเครื่องมือเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงและความหนาของอลูมิเนียมบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม จากการเปรียบเทียบความเร็วป้อนของเครื่องมือเชื่อมพบว่าที่ความเร็วป้อน 8 มม./นาที่ ให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยบริเวณใต้บ่าเครื่องมือที่ต่ำสุดเท่ากับ 62.9



วิกเกอร์สเกล ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนมีค่าสูงสุดเมื่อความเร็วป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วป้อน 10 มม./นาที ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณใต้บ่าเครื่องมือที่ 64.58 วิกเกอร์สเกล จะเห็นว่าเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลง

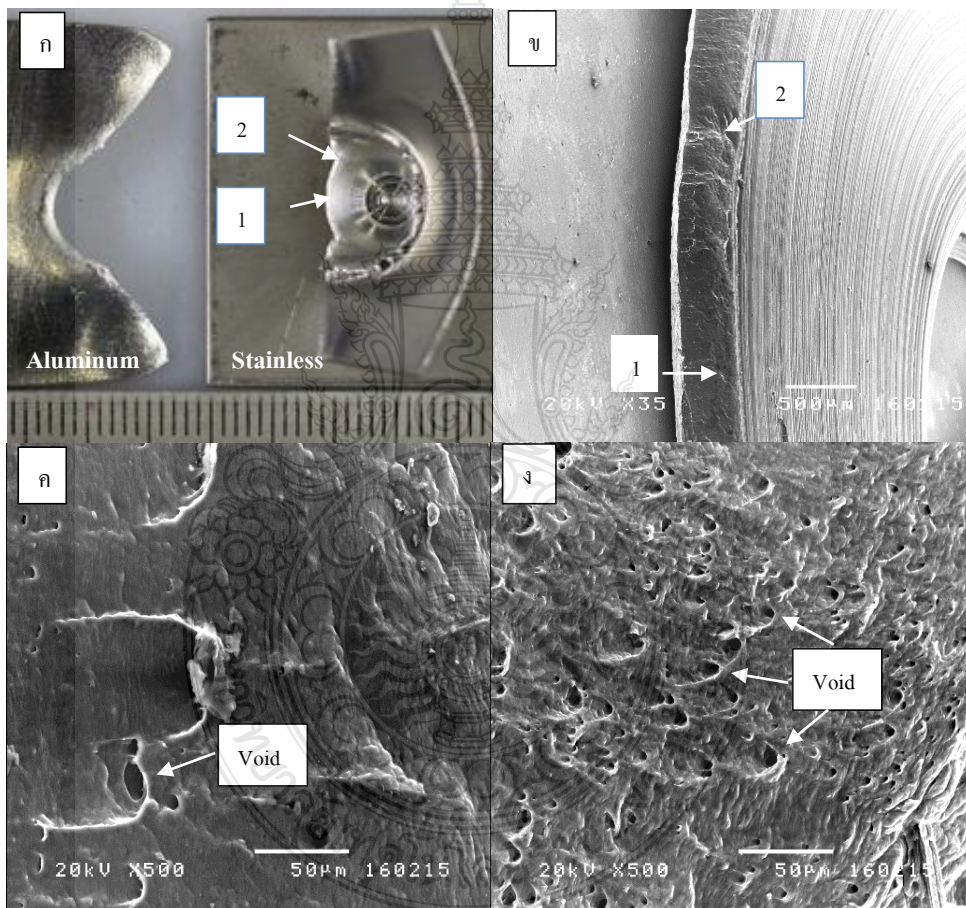


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของ Hardness กับ Feeds และ Effective Thickness ( $t_e$ ) ของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือ T1 ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 4-10 มม./นาที

เปรียบเทียบระยะความหนาบริเวณใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม T1 พบว่าเมื่อความเร็วป้อนของเครื่องมือเชื่อมเพิ่มขึ้นความหนาใต้บ่าเครื่องมือลดลง จากรูปที่ 4.16 พบว่าความเร็วป้อน 4 มม./นาที ให้ค่าความหนาใต้บ่าเครื่องมือสูงสุดเท่ากับ 7530 ไมโครเมตร เมื่อความเร็วป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 6 มม./นาที ทำให้ความหนาลดลง ค่าความหนาใต้บ่าเครื่องมือเท่ากับ 7490 ไมโครเมตร ความเร็วป้อน 8 มม./นาที ให้ค่าความหนาใต้บ่าเครื่องมือเท่ากับ 7150 ไมโครเมตร ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและความเร็วป้อน 10 มม./นาที ให้ค่าความหนาใต้บ่าเครื่องมือต่ำสุดเท่ากับ 7140 ไมโครเมตร

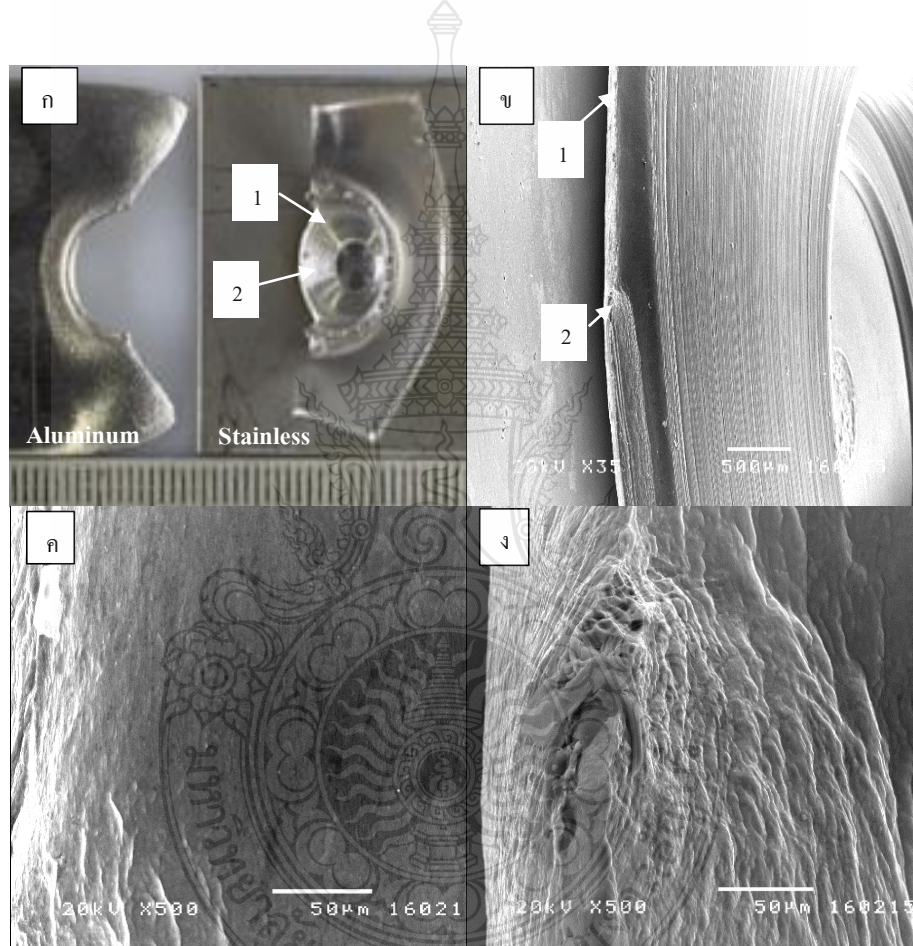
#### 4.4 การเปรียบเทียบลักษณะการพังทลาย

การเปรียบเทียบรูปแบบของเครื่องมือในการเชื่อมในการเชื่อมที่ส่งผลต่อแรงดึงเดือนในหัวข้อที่ 4.1-4.3 พบว่าเครื่องมือในการเชื่อม T1 ให้ค่ารับแรงดึงเดือนสูงสุดคือ การเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อมที่ 8 มม./นาที ความเร็วรอบการเชื่อม 3000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุด และที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนต่ำสุดเป็นค่าเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของการพังทลายที่มีส่งผลต่อแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.17-4.18 โดยผ่านการตรวจสอบตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 4.17 รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง ก. การพังทลายของรอยเชื่อม ข. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย ค. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1 ง. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 2

การพังทลายของรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงดึงเหนือสูงเกิดขึ้นที่อูมิเนียมไม่ได้เกิดขึ้นที่อินเทอร์เฟซ แสดงว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรง เมื่อพิจารณาตำแหน่งในการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของการพังทลาย รูปที่ 4.17 ข ตำแหน่งที่ 1 และ 2 จะเห็นการพังทลายที่ตำแหน่ง 1 จะเกิดช่องว่าง (Void) และแนวของการยึดตัวเล็กน้อยตามรูปที่ 4.17 ค และการพังทลายที่ตำแหน่ง 2 จะเกิดช่องว่าง และแนวของการยึดตัวจำนวนมากดังรูปที่ 4.17 ง. ตามลำดับ ลักษณะการพังทลายแบบนี้เป็นการพังทลายแบบเหนียวจะส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงดึงสูงเพราะรอยเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำ



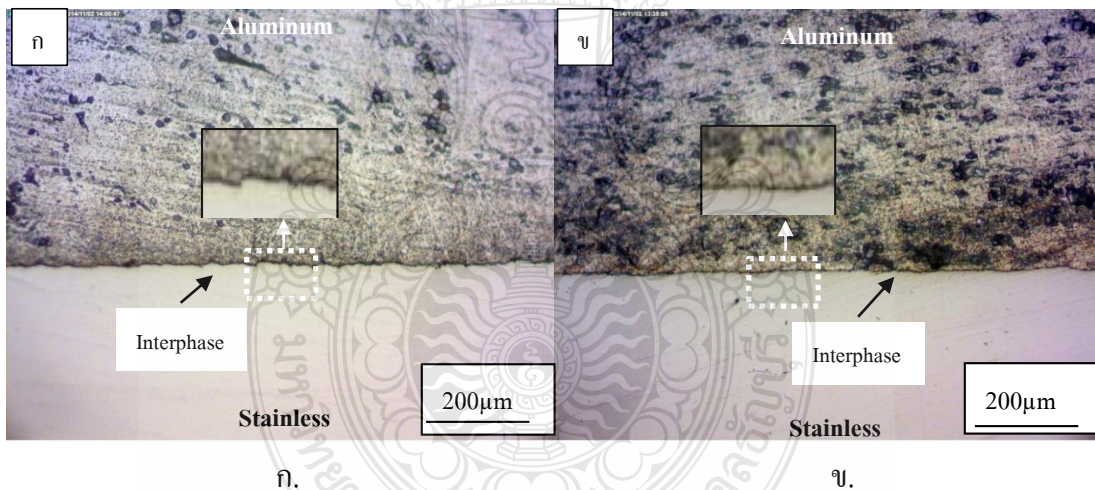
รูปที่ 4.18 รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ ก. การพังทลายของรอยเชื่อม ข. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย ค. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1 ง. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 2

การพังทลายของรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงดึงเหนือต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่อูมิเนียมดังรูปที่ 4.18 ก. ไม่ได้เกิดขึ้นที่อินเทอร์เฟซ แสดงว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรง เมื่อพิจารณา โครงสร้างจุลภาคของการพังทลายตำแหน่งที่ 1 และ 2 รูปที่ 4.18 ข พบว่าโครงสร้างตำแหน่งที่ 1 จะไม่เกิดช่องว่าง ตาม

รูปที่ 4.18ค. และ โครงสร้างตำแหน่งที่ 2 รูปที่ 4.18ง. ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะการพังทลายแบบเปราะจะส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงดิ่งต่ำเพราะรอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูง

#### 4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ได้รับความร้อน TMAZ ดังรูปที่ 4.19 พบว่าความเร็วรอบในการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงดิ่งแนวเชื่อมจากการทดสอบแรงดิ่งพบว่าความเร็วรอบในการเชื่อม 3000 รอบ/นาที ความเร็วป้อนที่ 8 มม./นาที ให้ค่ารับแรงดิ่งสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบในการเชื่อมอื่นจากการสังเกตโครงสร้างบริเวณอินเทอร์เฟซพบว่าที่ความเร็วรอบในการเชื่อมที่ 3000 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.19ก. พบว่าที่บริเวณอินเทอร์เฟซเกิดลักษณะคล้ายฟันเลื่อยทำให้เกิดการแทรกตัวของอลูมิเนียมในเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อความเร็วรอบในการเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 4000 รอบ/นาที แสดงดังรูปที่ รูปที่ 4.19ข. พบว่าที่บริเวณอินเทอร์เฟซจะไม่เกิดลักษณะฟันเลื่อย มีการแทรกของอลูมิเนียมเข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งอ่อนลดลง และมีค่าต่ำสุด

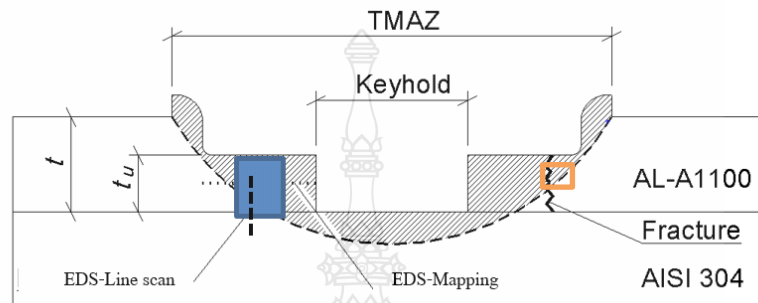


รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ ก. 3000 รอบ/นาที ข. 4000 รอบ/นาที

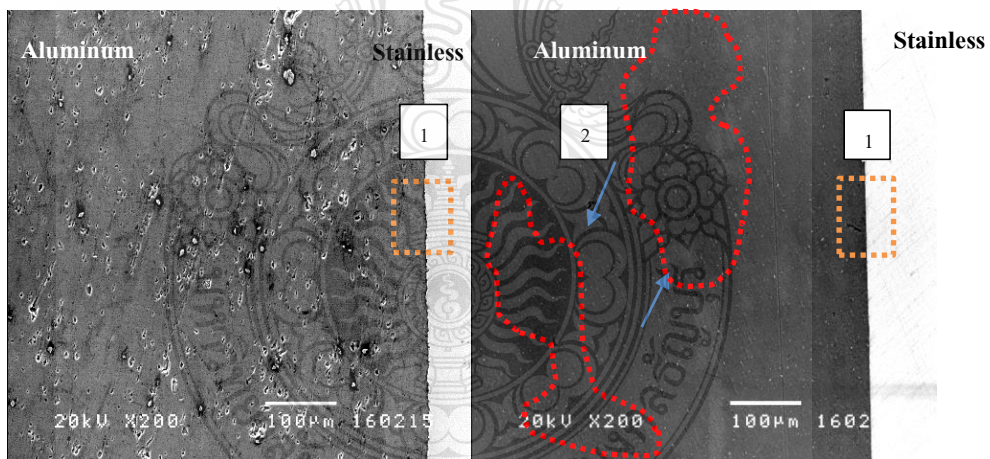
#### 4.6 ผลตรวจสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพของชิ้นงานเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Mapping และ EDS-Linescan ทำการตรวจสอบบริเวณใต้ปาเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.20 ของชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่าในการรับแรงดิ่งสูงสุดกับชิ้นงานที่รับแรงต่ำสุดของเครื่องมือเชื่อมแบบ

บ่าเรียบ T1 ความเร็วป้อน 8 มม./นาที รอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงถึงเดือนสูงสุด เป็นการเชื่อมที่ความเร็วรอบในการเชื่อม 3000 รอบ/นาที และรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงต่ำสุดเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที ซึ่งรอยเชื่อมทั้งสองจะนำมาวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ด้วย EDS-Mapping และ EDS-Linescan แบบ Speedmap



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ด้วย EDS-Mapping และ EDS-Linescan



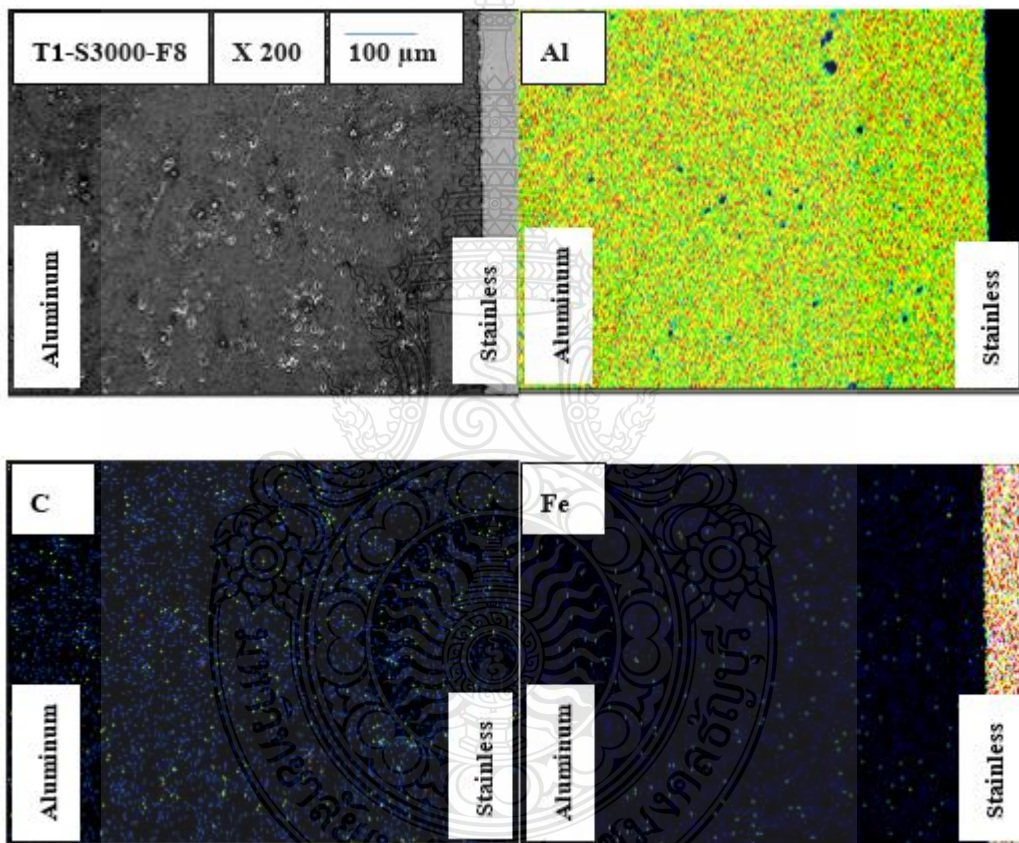
ก.

ข.

รูปที่ 4.21 ลักษณะของรอยเชื่อมในตำแหน่งวิเคราะห์ EDS-Mapping ของรอยเชื่อม ก. รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง ข. รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ

จะเห็นว่าบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงดังรูปที่ 4.21ก. จะมีการแทรกตัวของอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม มีลักษณะคล้ายฟันเรื้อย บริเวณตำแหน่ง 1 จะทำให้รอย

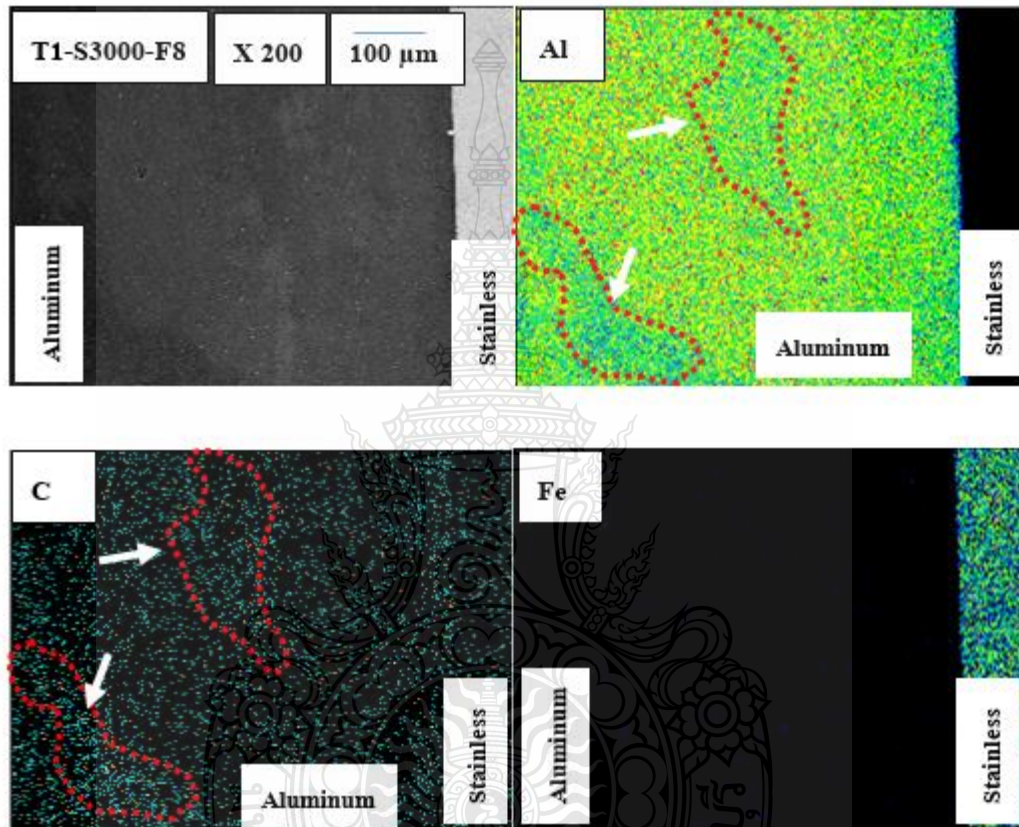
เชื่อมมีความแข็งแรงสูง ลักษณะจุดในเนื้ออลูมิเนียมเกิดจากการเตรียมผิวงานกัดกรดไม่เรียบ เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงเฉือนลดลงดังรูป 4.21ข. บริเวณอินเทอร์เฟซบริเวณตำแหน่ง 1 จะไม่เกิดลักษณะพื้นเรียบ และเนื้ออลูมิเนียมบริเวณอินเทอร์เฟซจะเกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำ บริเวณเนื้ออลูมิเนียมบริเวณตำแหน่ง 2 จะเกิดริ้วสีเข้ม ผลจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบริเวณพื้นที่ได้รอยเชื่อม ด้วย EDS-Mapping ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึงเฉือนสูงและรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึงเฉือนต่ำแสดงดังรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ



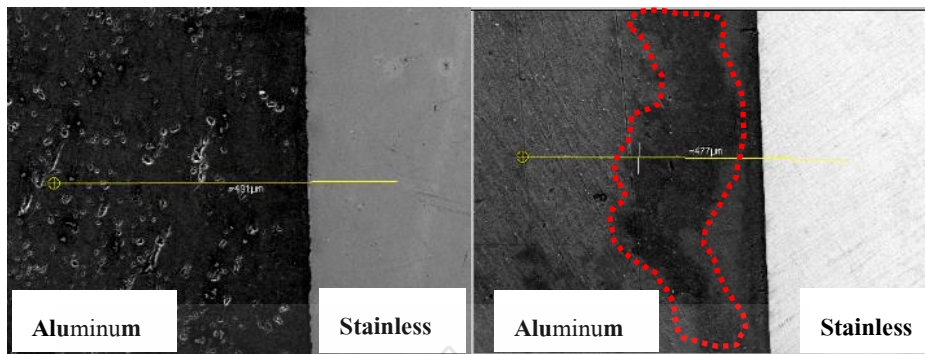
รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย EDS-Mapping ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึงเฉือนสูง

จะเห็นว่าความเข้มข้นของธาตุอลูมิเนียมมาก การกระจายตัวสม่ำเสมอและมีธาตุคาร์บอนเหลือปริมาณเล็กน้อยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้ออลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.22 ส่งผลให้รอยเชื่อมนี้มี

ความแข็งแรงดิ่งสูง เปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดิ่งต่ำ ดังรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าความเข้มข้นของธาตุอลูมิเนียมกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ บริเวณที่เป็นแถบริ้วเข้มในเนื้ออลูมิเนียมในรูปที่ 4.21ข. ความเข้มข้นของธาตุอลูมิเนียมจะลดลงแต่มีความเข้มข้นของธาตุคาร์บอนเพิ่มเข้ามาแทน บริเวณที่ธาตุอลูมิเนียมที่หายไป ส่งผลให้รอยเชื่อมนี้มีความแข็งแรงดิ่งต่ำ



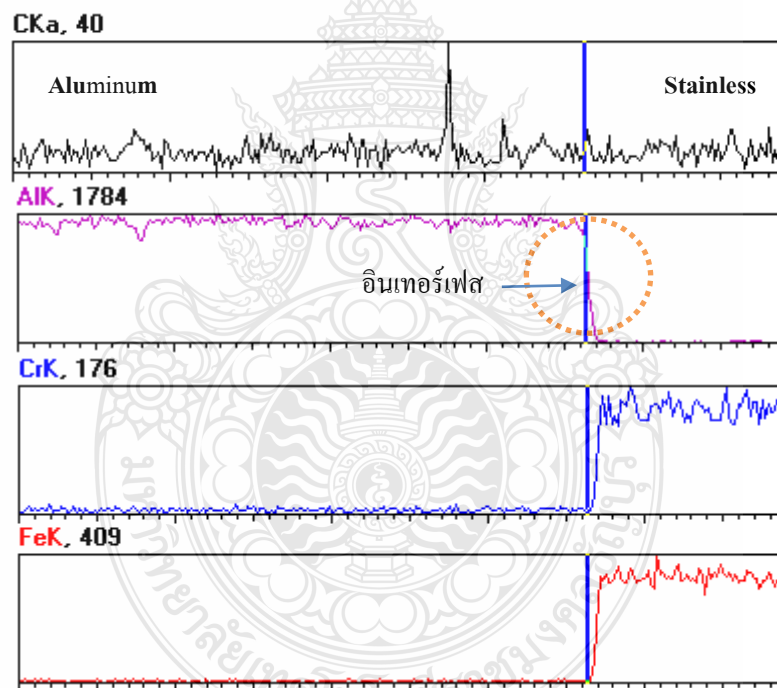
รูปที่ 4.23 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ด้วย EDS-Mapping ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดิ่ง  
 เลื่อนต่ำ



ก.

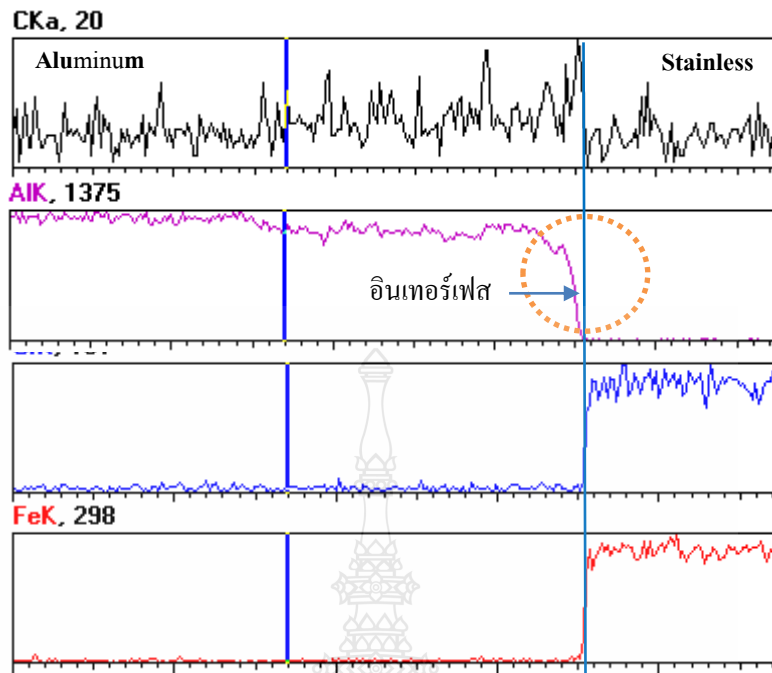
ข.

รูปที่ 4.24 ลักษณะของรอยเชื่อมในตำแหน่งวิเคราะห์ EDS-LineScan ของรอยเชื่อม ก. รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูง ข. รอยเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำ



รูปที่ 4.25 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ด้วย EDS-LineScan ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดีถึงเหนือสูง





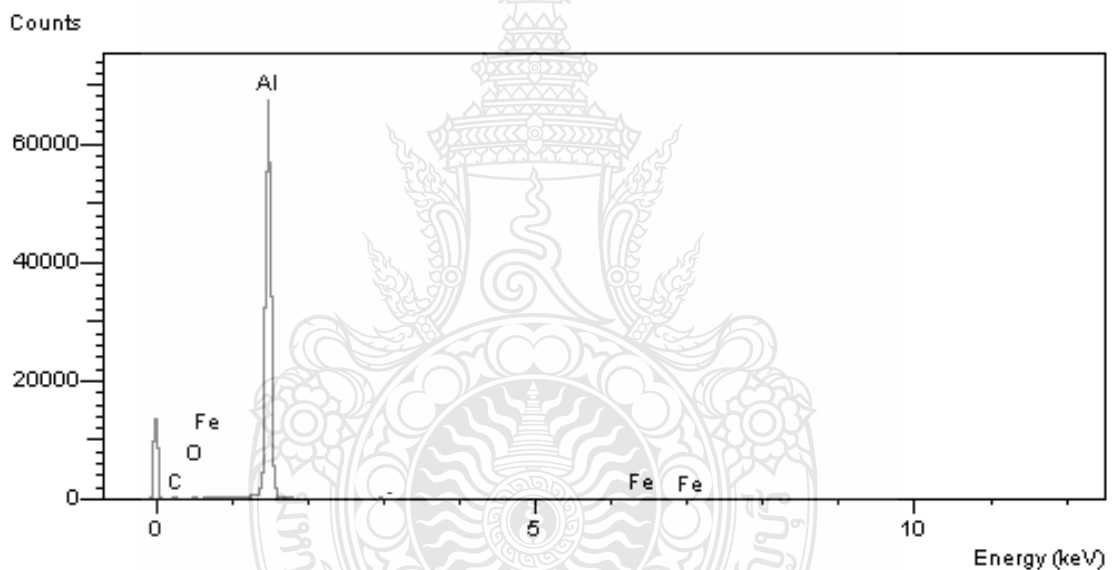
รูปที่ 4.26 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย EDS-Mapping รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดี  
เนียนต่ำ

จากตำแหน่งการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS-Linescan ดังรูปที่ 4.24ก. ของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงจะเห็นว่าสีของอลูมิเนียมมีความสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 4.25จะพบว่าความเข้มข้นของธาตุอลูมิเนียมมากมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และส่วนธาตุคาร์บอน มีเข้มข้นน้อย การกระจายตัวมีความสม่ำเสมอ และบริเวณอินเทอร์เฟซอลูมิเนียมมีการแทรกตัวในเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งสอดคล้องกับลักษณะอินเทอร์เฟซที่คล้ายกับพื้นผิวในรูป 2.4ก สำหรับรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำในรูปที่ 4.24ข. ในเนื้ออลูมิเนียมจะเป็นรูสีเข้ม ทำสีของอลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอ ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS-Linescan ดังรูปที่ 4.26 พบว่าความเข้มข้นของอลูมิเนียมจำนวนมากมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ในตำแหน่งที่เป็นรูสีเข้มความเข้มข้นของธาตุอลูมิเนียมจะลดลง และความเข้มข้นของธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นในบริเวณที่เป็นรูสีเข้ม บริเวณใกล้อินเทอร์เฟซความเข้มข้นของอลูมิเนียมลดลงมาก เนื่องจากเกิดรูพรุนและบริเวณอินเทอร์เฟซอลูมิเนียมไม่แทรกเข้ามาในเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้อินเทอร์เฟซไม่เกิดโครงสร้างแบบพื้นผิวส่งผลให้ความแข็งแรงดีเหมือนต่ำเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงและรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำแสดงดังตารางที่ 4.1 และสำหรับการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1..ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมบริเวณที่เกิดการพังทลาย

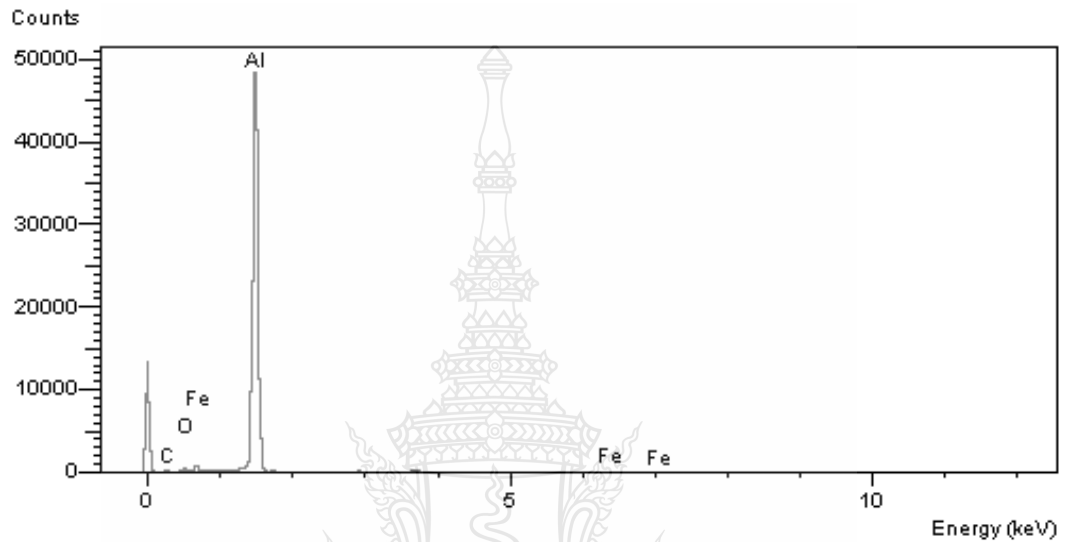
ความเร็วรอบ	ร้อยละของธาตุ		
	C	Al	Fe
S3000	14.07	82.11	0.22
S4000	17.98	77.42	0.31



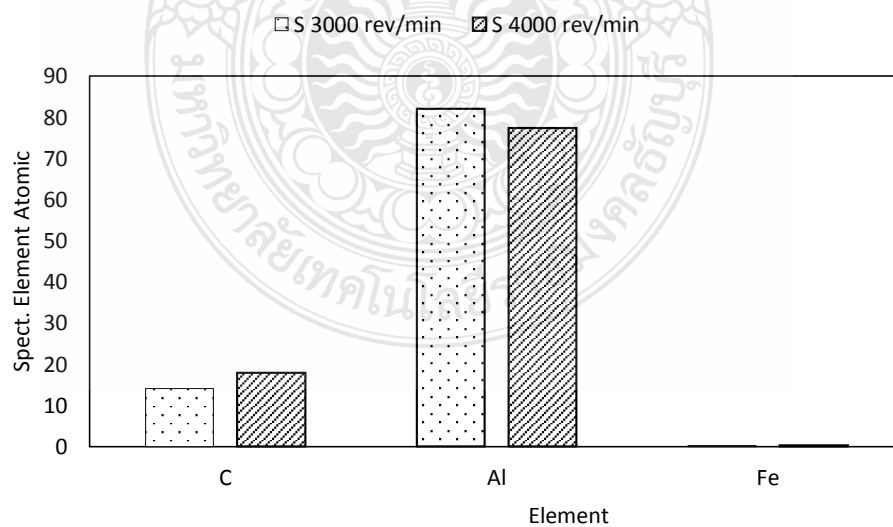
รูปที่ 4.27 กราฟการกระจายตัวความเข้มข้นของธาตุของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง

รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที มีความแข็งแรงสูงสุดจะมีความเข้มข้นของธาตุอลูมิเนียมร้อยละ 82.11 คาร์บอนร้อยละ 14.07 เหล็กร้อยละ 0.22 ธาตุดังตารางที่ 4.1 เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 4000 รอบ/นาที พบว่าความเข้มข้นธาตุอลูมิเนียมลดลงและความเข้มข้นของธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเดือนลดลง รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึงเดือนต่ำมีความเข้มข้นของธาตุอลูมิเนียมร้อยละ 77.42 ความเข้มข้นของธาตุคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 17.98 ดังรูป 4.27-4.28

เปรียบเทียบปริมาณการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping พบว่าร้อยละของธาตุมีส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเนื้ รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึงสูงจะมีร้อยละของอลูมิเนียมสูงกว่าทำให้รอยเชื่อมมีความเหนียวกว่า และร้อยละของธาตุคาร์บอนต่ำกว่า ทำให้มีความแข็งน้อยกว่าส่งผลให้ความแข็งแรงดึงสูงกว่่าดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.28 กราฟการกระจายตัวความเข้มข้นของธาตุของรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบปริมาณการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของชิ้นงานเชื่อม

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาค้นคว้าและทดลองถึงความเป็นไปได้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดบนรอยต่อเกลย ระหว่างอลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิม (FSJ) ด้วยเครื่องมือเชื่อมที่มีลักษณะป่าของเครื่องมือแตกต่างกัน 5 แบบ เพื่อที่จะเพิ่มทางเลือกในการเชื่อมให้กับผู้ที่สนใจและนำไปประยุกต์ใช้กับงานในอุตสาหกรรม ที่จะสามารถพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดบนรอยต่อเกลยระหว่างอลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อใช้ในงานวิจัยต่อไปซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองอภิปรายผลและมีข้อเสนอแนะดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดบนรอยต่อเกลย ระหว่างอลูมิเนียมผสม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ด้วยเครื่องมือเชื่อมที่มีลักษณะป่าของเครื่องมือเชื่อมที่แตกต่างกัน 5 แบบ จากการทำการทดลองพบว่าเครื่องมือเชื่อมที่มีป่าแบนเรียบจะทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุด

5.1.2 ลักษณะรูปทรงป่าเครื่องมือเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือน ลักษณะป่าที่มีพื้นผิวสัมผัสน้อย ทำให้เกิดความร้อนเสียดทานน้อยส่งจะผลให้ความแข็งแรงดึงเฉือนสูง

5.1.3 เครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงป่าแบนเรียบ เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที และความเร็วป้อน 8 มม./นาที ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงสุด 2100 นิวตัน

5.1.4 ความหนาของอลูมิเนียมบริเวณใต้ป่าเครื่องมือเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

5.1.5 ความแข็งแรงดึงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งของอลูมิเนียมบริเวณใต้ป่าเครื่องมือเชื่อมลดลงและเครื่องมือที่มีป่าเรียบหรือ T1 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยบริเวณใต้ป่าเครื่องมือต่ำสุดที่ 62.79 วิกเกอร์สเกล

5.1.6 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน พบว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กัน ถ้าเปลี่ยนตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดบนรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และปัญหาที่พบจากการดำเนินงานและทำการเชื่อม ดังนั้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดบนรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงได้สรุปรวบรวมปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเตรียมชิ้นงานในการเชื่อม การเตรียมชิ้นงานเป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่ง เพราะถ้าเตรียมชิ้นงานไม่ดี อาจส่งผลกระทบต่อการยึดติดกันของรอยเชื่อม ทำให้รอยเชื่อมที่ได้ไม่มีความแข็งแรง และควรเตรียมชิ้นงานให้พอดีกับอุปกรณ์จับยึด

5.2.2 ในการเชื่อมแต่ละครั้งจะมีอุณหภูมิติดมากับตัวงานของเครื่องมือเชื่อมควรทำความสะอาดทุกครั้งก่อนเชื่อมในครั้งต่อไป

5.2.3 เมื่อทำการเชื่อมไปสักระยะจะเกิดความร้อนสะสมในอุปกรณ์จับยึด เครื่องมือเชื่อม ควรหยุดเชื่อมเพื่อลดความร้อน

5.2.4 ควรให้มีการวิเคราะห์แบบจำลองร่วมด้วยเพื่อที่จะได้เห็นการไหลของเนื้อโลหะตามลักษณะของเครื่องมือเชื่อมและรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อม



## บรรณานุกรม

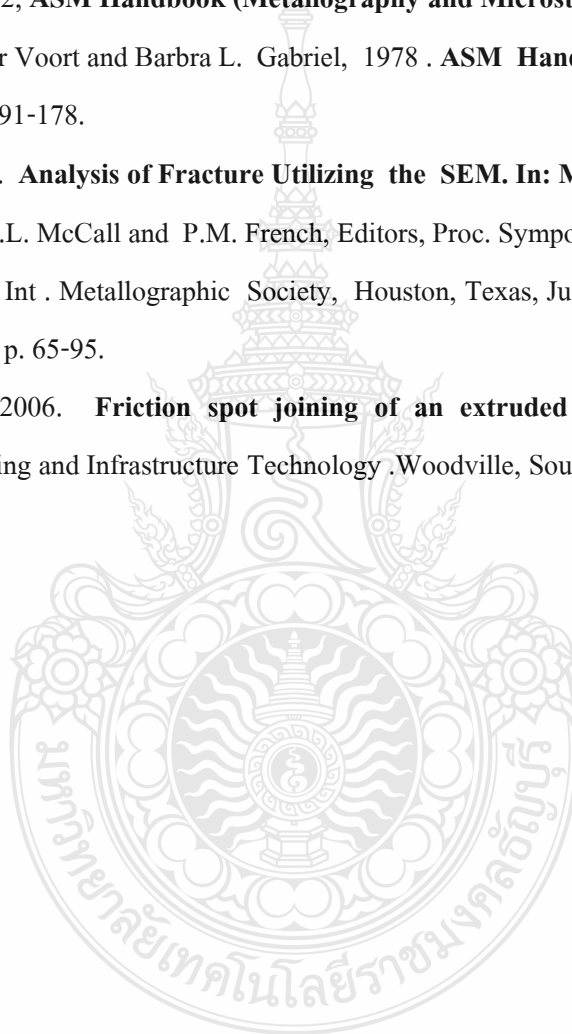
- [1] M. Fujimoto, S. Koga, R. Ohashi and K. Fukuhara. **“Friction Spot Joining for Automotive Industry.”** Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 173-179.
- [2] K. Tanaka and M. Kumagai. **“Dissimilar Joining of Aluminum Alloy and Steel Sheets by Friction Stir Spot Welding.”** Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 181-189.
- [3] Z. Sun and R. Karppi, R. **“The Application of Electron Beam Welding for the Joining Of Dissimilar Metals: An Overview.”** Journal of Materials Processing Technology, 59 (1996) 257-267.
- [4] Lin, P.-C., Pan, J., Pan, T., 2008a. **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 30,74–89.
- [5] Lin, P.-C., Pan, J., Pan, T., 2008b. **Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets.** Part 2. Welds made by a flat tool. International Journal of Fatigue 30, 90–105.
- [6] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2550. **“อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อความแข็งแรงรอยต่อเกลียวอลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304”** การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2550, 24-26 ตุลาคม, ภูเก็ต, หน้า 1-6. (In Press).
- [7] อนันต์ วงศ์กระจ่าง. 2553. **การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล.** สำนักพิมพ์โอเดียนส โตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [8] ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรจน์ จูติเกียรติพงศ์. 2539. **วัสดุในงานวิศวกรรม.** ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพมหานคร.
- [9] มนต์ สติรจินดา. 2541. **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก.** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [10] [Http://www.aluminiumlearning.com](http://www.aluminiumlearning.com), เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 1 เมษายน 2558).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] ไพโรจน์ ฐานวิเศษ. 2540. โลหะวิทยา. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, นครราชสีมา.
- [12] Sidney H. Avner, 1994. **Introduction to Physical Metallurgy**, Mc. Graw-Hill Book Company, Tokyo.
- [13] William F. Smith, 1994. **Structure and Properties of Engineering alloys**. Mc. Graw-Hill Book Company, Tokyo.
- [14] Watanabe, T. and Doi, H. 2005. “Resistance Spot Welding of Mild Steel to Al-Mg Alloy.” **Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly**, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 117-123.
- [15] KAWASAKI. 2004. **Friction Spot Joining**, แหล่งที่มา <http://www.kawasakirobotics.com/PDFs/FSJ.pdf>, 10 พฤศจิกายน 2549.
- [16] [Http://eng.sut.ac.th/cemattestpdf50mat\\_test\\_5.pdf](Http://eng.sut.ac.th/cemattestpdf50mat_test_5.pdf) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 1 เมษายน 2558).
- [17] [Http://e-book.ram.edue-bookmMY318\(51\)MY318-11.pdf](Http://e-book.ram.edue-bookmMY318(51)MY318-11.pdf) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 1 เมษายน 2558).
- [18] [Http://elearning.spu.ac.th/allcontentStructure\\_in\\_Architecturecourse\\_outline5.html](Http://elearning.spu.ac.th/allcontentStructure_in_Architecturecourse_outline5.html) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 1 เมษายน 2558).
- [19] นิรันดร์ เขียมสำอาง และรัชชัช นามวิเศษ 2549 การเชื่อมพริกชั้นแบบจุดบนรอยต่อเกย. ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [20] [Http://th.wikipedia.org/wiki/Vickers\\_hardness](Http://th.wikipedia.org/wiki/Vickers_hardness) เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 1 เมษายน 2558).
- [21] ไพโรจน์ ฐานวิเศษ. 2545. พื้นฐานทางโลหะวิทยาและการจำแนกชนิดและมาตรฐานของเหล็ก. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.
- [22] ณัฐแก้วสกุล, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติทางกลของรอยต่อเกยอะลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2551.

## บรรณานุกรม (ต่อ)


- [23] กฤษ เหลืองโสภานันท์ และ ฉวีวรรณ พุทธนานิวัฒน์กุล 2553. การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมที่เกิดจากการรับภาระกรรมทางกลด้วยการตรวจสอบสภาพผิวแตก. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ฉบับที่ 74 หน้า 78-92.
- [24] H. E. Exner., 1992, **ASM Handbook (Metallography and Microstructure)** Vol. 9, p. 90.
- [26] George F. Vander Voort and Barbra L. Gabriel, 1978 . **ASM Handbook (Fractography)**, Vol. 12, p. 91-178.
- [27] M . Russo., 1978. **Analysis of Fracture Utilizing the SEM. In: Metallography in Failure Analysis**, J.L. McCall and P.M. French, Editors, Proc. Sympos. American Society for Metals and Int . Metallographic Society, Houston, Texas, July 7-8, 1977, Plenum Press, New York, p. 65-95.
- [ 28] S. Lathabai., 2006. **Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy**. CSIRO Manufacturing and Infrastructure Technology .Woodville, South Australia 5011,p 899-902.



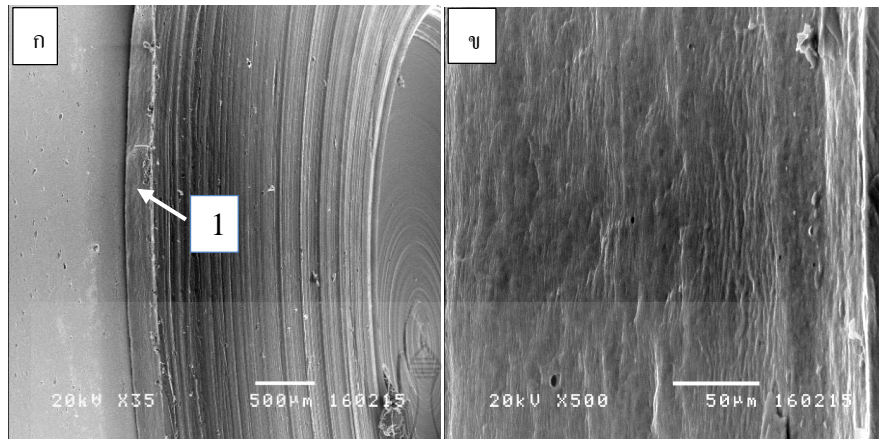


ภาคผนวก

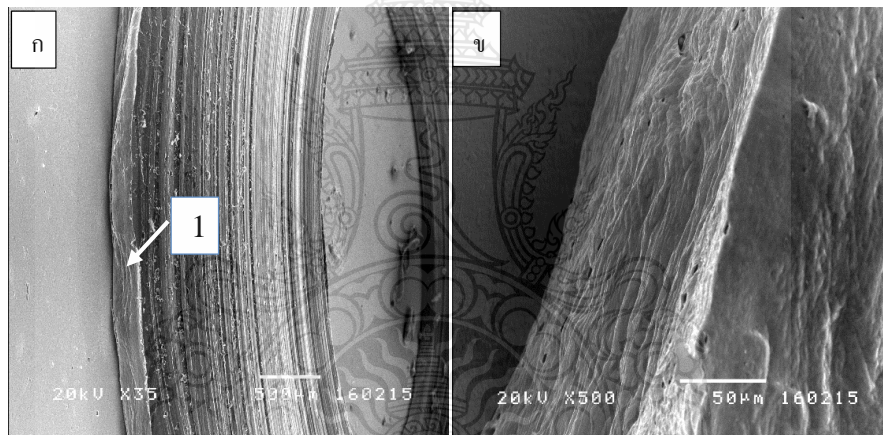




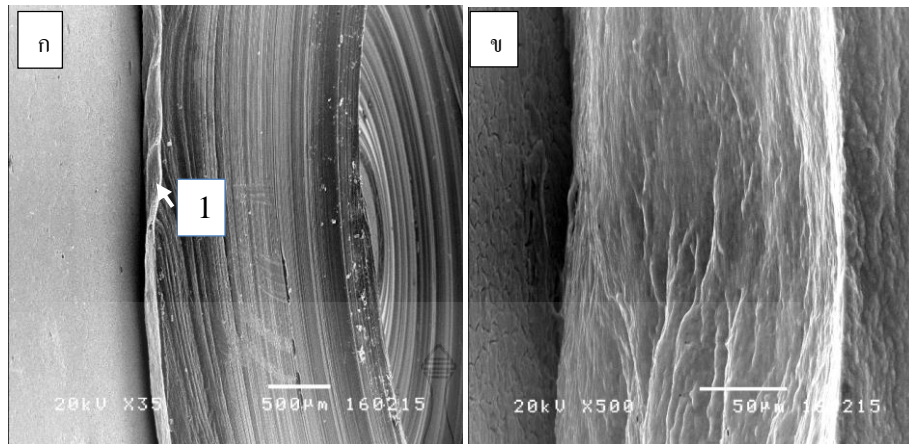
ภาคผนวก ก  
ลักษณะโครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม



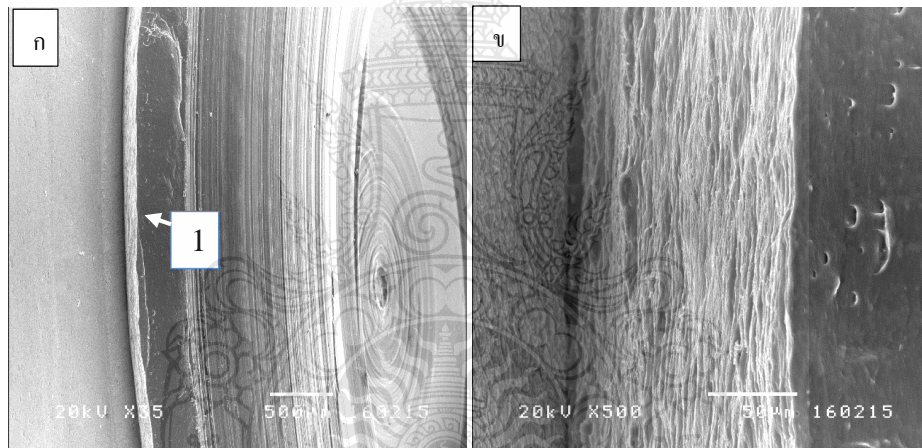
**รูปที่ ก1** รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 ก. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย  
ข. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1



**รูปที่ ก2** รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T3 ก. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย  
ข. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1



รูปที่ ก3 รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ก. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย  
 ข. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1

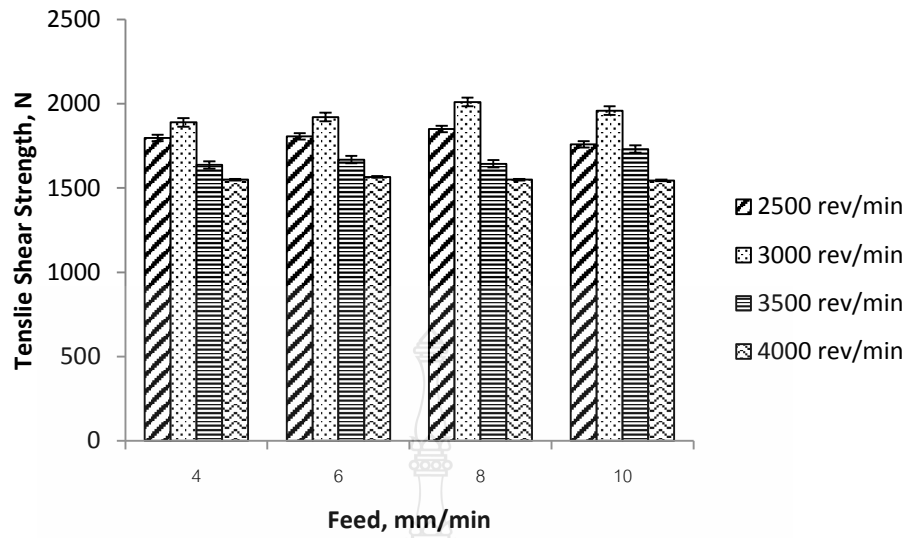


รูปที่ ก4 รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T5 ก. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่พังทลาย  
 ข. โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งที่ 1

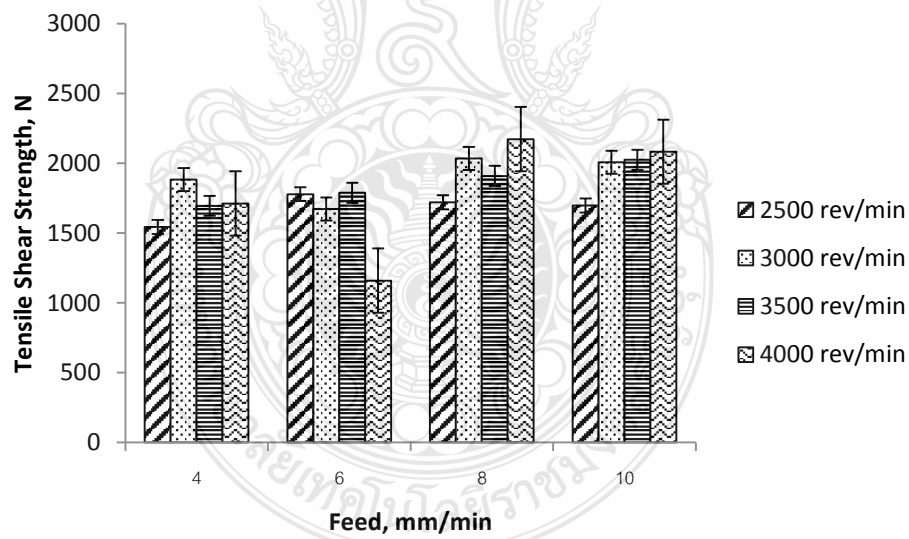


ภาคผนวก ข

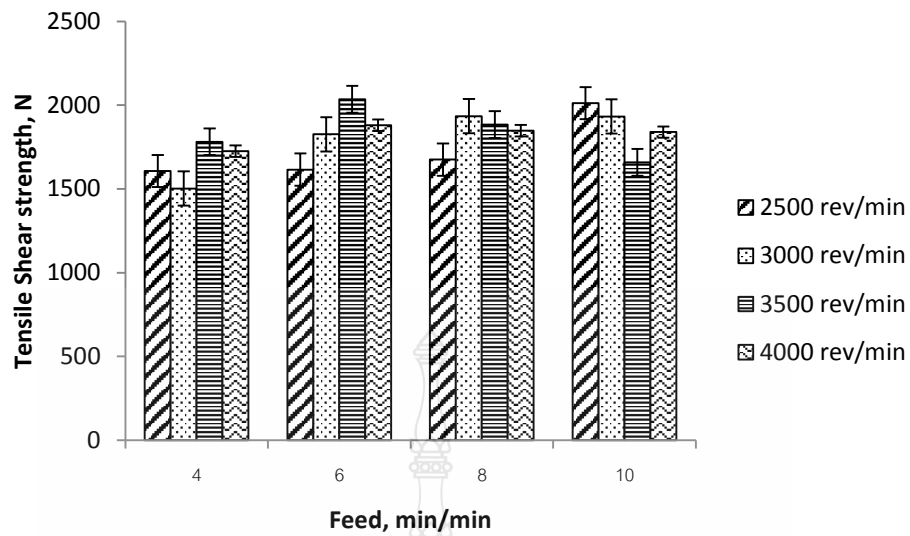
ผลการทดสอบสมบัตินักศึกษา



รูปที่ ข1 ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็ว 4 8 6 10 มม./นาที เครื่องมือเชื่อม T1 ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที



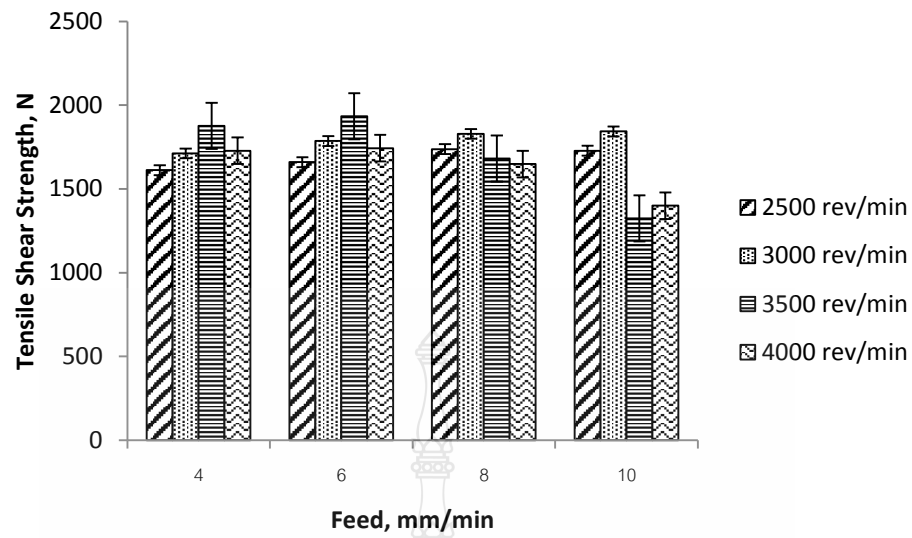
รูปที่ ข2 ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็ว 4 8 6 10 มม./นาที เครื่องมือเชื่อม T2 ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที



รูปที่ ข3 ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็ว 4 8 6 10 มม./นาที เครื่องมือเชื่อม T3  
ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที



รูปที่ ข4 ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็ว 4 8 6 10 มม./นาที เครื่องมือเชื่อม T4  
ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที



**รูปที่ ข5** ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็ว 4 8 6 10 มม./นาที เครื่องมือเชื่อม T5  
ความเร็วรอบในการเชื่อม 2500 3000 3500 4000 รอบ/นาที



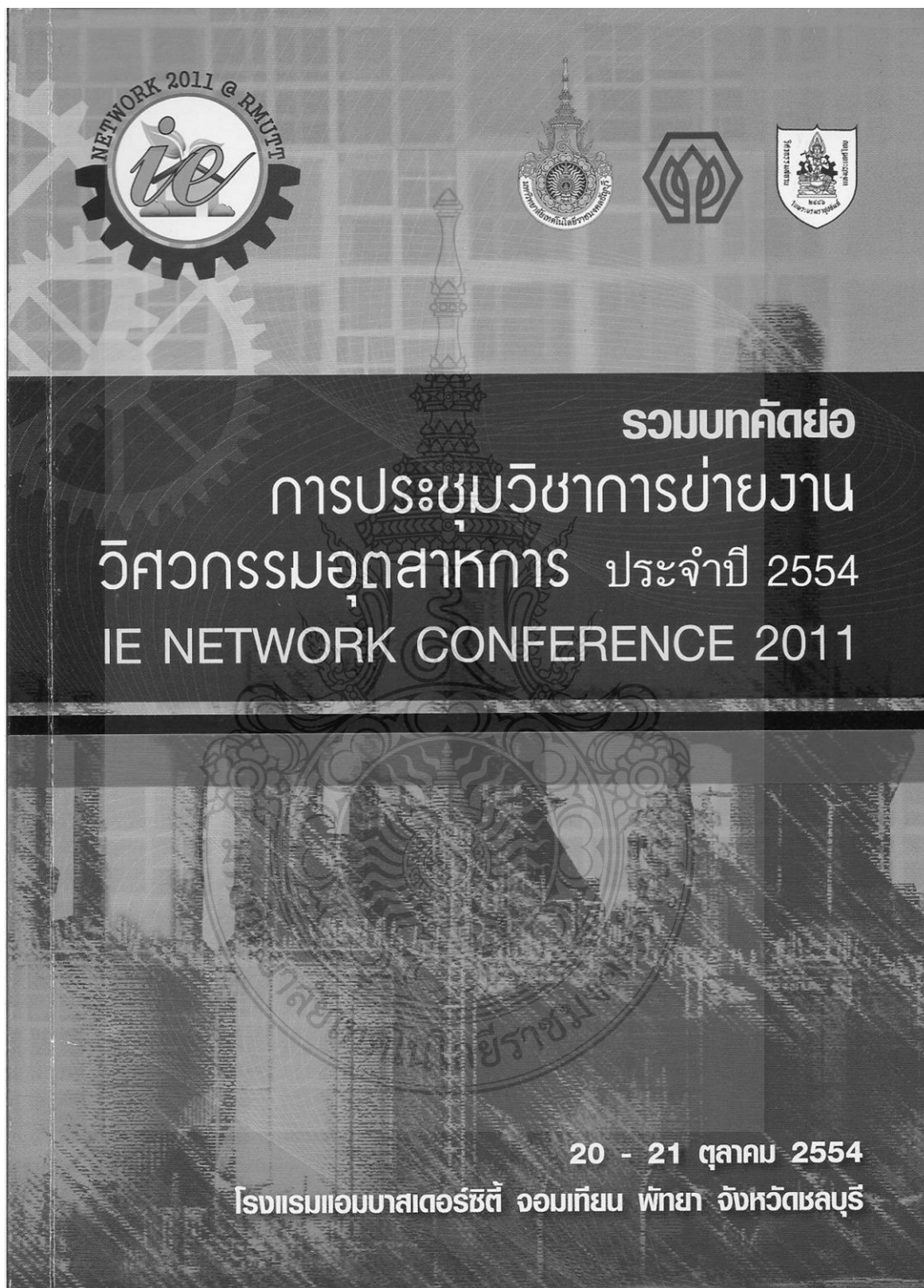




ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ  
การประชุมข่างานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี ๒๕๕๔

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา ฐักิจการพานิช  
ผศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย  
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน์

รศ.ดร.ปารเมศ ชุติมา  
ผศ.ดร.คาริชา สุธีวงศ์  
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ปฎิภาณ ขุ้ยเจิม  
ดร.สุदारัตน์ วงศ์กักรเกียรติ

ดร.ปุ่นมี สัจกมล  
ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง  
ดร.ศิริรัตน์ หมั่นวนิชกุล  
อ.จันจิรา คงชื่นใจ

ดร.เพ็ญสุดา พันฤทธิ์ดำ  
ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ชานนท์ มุลวรรณ  
อ.ประภาพรรณ เกษราพงศ์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ  
อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.พรเทพ ขอบจายเกียรติ  
ผศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว  
ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์  
ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล

รศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล  
ผศ.ดร.दनัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์  
ดร.ธนา ราษฎร์ภักดี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.วิชัย ถัสตรทินวัฒน์  
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล  
ผศ.ดร.สรรฐติชัย ชีวสุททธิศิลป์  
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์  
ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์  
ดร.อนิรุท ไชยจารุวิช

รศ.ดร.วิมลนิน เหล่าศิริถาวร  
ผศ.ดร.วัสสนัย วรรณจรรย์  
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภางแดง  
ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพยาวงศ์  
ดร.วสวัชร นาคเขียว

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

รศ.คมสัน จิระภัทรศิลป์

รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล

ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์

ผศ.พจมาน เตียววัฒนรัฐติกาล

ดร.วิศิษฐ์ศรี วิยะรัตน์

อ.ปรัชญา เพ็ญสุระ

รศ.ดร.บวร โชค ผู้พัฒนา

รศ.สันติรัฐ นันสะอาง

ผศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์

ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**

รศ.วันชัย แผลมหลักสกุล

ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

รศ.ดร.กวรรณชัย กัลยาศิริ

รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์

ผศ.ดร.ศกนธ์ คล่องบุญจิต

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพัสกุล

ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

ดร.ชุมพล ขวงไย

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ**

ผศ.ดร.พิชัย จันทร์มณี

ผศ.วิชาญ ช่วยพันธ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล**

ผศ.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**

ดร.นเรศ อินตะวงศ์

ดร.บรรเจิด แสงจันทร์

ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

ผศ.มนวิภา อาวิพันธุ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย**

รศ.สุชาติ เย็นวิเศษ

ผศ.เดช เหมือนขาว

ผศ.สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล

ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ดร.ปภากร สุนานนท์

ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล

ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ดร.ปภากร สุรนันทน์  
อ.นรา สมัตถภาพงศ์

#### มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรวัดน์ ชีระวราพฤกษ์  
ผศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์เกียรติ  
ผศ.ดร.สวัสดิ์ ภาชนะราช

#### มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ  
ดร.ขวัญนิตี คำเมือง  
ดร.ภาณุ บูรณจารุกร  
อ.ศรีสัจจา วิทยาศักดิ์

#### มหาวิทยาลัยปทุมธานี

ดร.ภาสพิรุฬ ศรีสำเริง

#### มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป  
ผศ.ดร.บพิท บุปผโชติ  
ดร.นิตา ชัยมุล

#### มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์  
ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ

#### มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร.ชนวรรณ อัสวโพบูลย์  
ผศ.สินี สุขกรมไส  
ผศ.ศิลปชัย วัฒนเสย  
อ.พรรคพงษ์ แก่นณรงค์

#### มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.กฤษฎดา พิศัลย์บุตร  
อ.นุกูล อุบลบาน

ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

รศ.ดร.จิรศิริพงศ์ เจริญภัณฑ์  
ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัมฤทธิ์  
ผศ.ดร.เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์

ผศ.ศิษญา สิมาร์กษ์  
ดร.สมลักษ์ณ์ วรรณฤมล  
อ.ธณิกานต์ ชงชัย

ผศ.ดร.สุตสาคร อินธิเดช  
ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์  
ผศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร  
ดร.พิชญ มนต์ปีติ  
อ.ต่อศักดิ์ อุทัยใจฟ้า  
อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

ดร.เลิศเลขา ณะชัยพันธ์  
อ.นันทวรรณ อ่ำเอี่ยม

### มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ชนรัตน์ เตวีวัฒนา

ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

ดร.ศิริเดช ซาดินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

### มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ผศ.พัฒนาพงษ์ อริยสิทธิ์

อ.จักรพันธ์ กัณหา

อ.ธนิน ศรีวระมย์

อ.วราภรณ์ พันธุ์คง

ดร.ธริณี มณีศรี

อ.ชวลิต มณีศรี

อ.พิสุทธิ์ รัตนแสนวงษ์

อ.สุพัฒตรา เกษรพงศ์

### มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

ผศ.ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ผศ.สุขุม โฆษิตชัยมงคล

ดร.กัญญา ทองสนิท

ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่า่ม

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์

ผศ.วันชัย ลีลากวีวงศ์

ผศ.สุวัฒน์ เนตรโต

ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง

### มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รศ.สมชาย ชูโณม

ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์

ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล

ผศ.ดร.รัชชานา สิ้นธวาลัย

ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.เจริญ เจตวิจิตร

ผศ.ยอดดวง พันธุ์ธรา

รศ.วนิดา รัตนมณี

ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา

ผศ.ดร.ชเนต รัตนวิไล

ผศ.ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์

ผศ.ดร.อรุณ ตั้งขพงศ์

ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ

ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

### มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อ.จิตลดา ชัมเจริญ

อ.วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษดิ์

อ.อรอุมา กอสนาน

อ.นิศากร สมสุข

อ.อัญชลี สุพิทักษ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม

ผศ.ดร.นุชศรา เกียรติกรกฎ

ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ผศ.ดร.สุขอังคณา ติ

ดร.จริยากร อุ่นวงษ์

สถาบันเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น

ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ.ชัยพฤกษ์ อาภาเวท

อ.เจษฎา วงศ์อ่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร

ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเชียร

ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสะอาด

ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ

ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ

ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์

ผศ.ดร.นลิน เพ็ชรทอง

ผศ.ดร.ปรีชา เกียรติกรกฎ

ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์

ดร.ธารชดา พันธุ์นิกุล

ดร.สันต์ โอพาพิริยะกุล

ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

ผศ.ประยูร สุรินทร์

รศ.มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์

ผศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพันธุ์

ผศ.ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง

ดร.ระพี กาญจนะ

ดร.สุนนมาลย์ เนียมหลา



## อิทธิพลของระยะลึกและรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อเชื่อม เสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 Effect of Depth Penetration and Tool Shoulder on Friction Spot Joining Joint Strength between AA1100 Aluminum Alloy and AISI304 Stainless Steel

อดิศร เปลียนดิษฐ์<sup>1\*</sup> กิตติพงษ์ กิมะพงษ์<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: Pliandit\_9@yahoo.com\*

### บทคัดย่อ

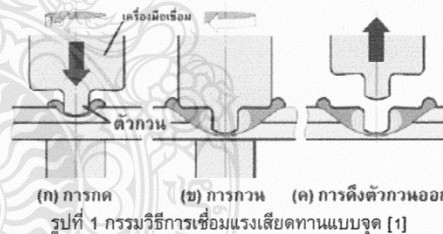
บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อการศึกษาอิทธิพลของระยะลึกและรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยมีผลการทดลองโดยสรุปดังนี้ รอยต่อเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเชื่อมติดกันและมีความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 179 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความแข็งแรงของรอยต่อเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะความลึกในการเชื่อมจากผิวอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น การเชื่อมที่ระยะขอบเขตระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมจะให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด เครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีรูปทรงบ่ากว้าง 2 มม. จะให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด

**คำหลัก** การเชื่อมเสียดทานแบบจุด, อลูมิเนียม, เหล็ก, รอยต่อเชื่อม, ความแข็งแรง

### 1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction spot joining: FSJ) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยกลุ่มบริษัทมาสด้า (Mazda Motor Cooperation) [1] และบริษัทอุตสาหกรรมหนักคาว่าซากิ (Kawazaki Heavy Industry) [2] เพื่อใช้ในการเชื่อมวัสดุแผ่นบางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของประเทศญี่ปุ่น โดยมีจุดประสงค์หลักในการลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานประกอบรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น โดยนำเอาวิธีการเชื่อมนี้เข้าไปทดแทนการเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW) หลักการอย่างง่ายในการทำให้เกิดรอยต่อของโลหะแผ่นบางแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งงานที่เป็นลักษณะของรอยต่อเชื่อมถูกวางยึดแน่นอยู่บนพื้นระนาบตั้งแสดงในรูปที่ 1 (ก) จากนั้นเครื่องมือเชื่อมที่เป็นรูปทรงกระบอกที่มีตัวกวนรูปทรงกระบอกขนาดเล็กติดอยู่ที่ส่วนปลาย ถูกทำให้หมุนด้วยความเร็วสูงที่กำหนดแล้วกดตัวกวนลงไปในรอยต่อด้วยความเร็ว แรงกด และระยะความลึกที่กำหนดจนกระทั่งบ่าของเครื่องมือจุ่มลงไปในผิวโลหะด้านบนของรอยต่อตั้งแสดงในรูปที่ 1 (ข) จากนั้นตัวกวนจะถูกกดแช่ที่ตำแหน่งนั้นตามระยะเวลา

ที่กำหนดแล้วถอนตัวขึ้นจากรอยต่อ จะได้รอยต่อที่เกิดการประสานกันของโลหะ 2 แผ่นดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) จากหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดรอยต่อในสถานะของแข็งที่โลหะบริเวณรอยต่อไม่ให้เกิดการหลอมละลายของโลหะจึงมีเหตุผลเป็นไปได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดนี้สามารถใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายอื่นๆ เช่น การเชื่อมอาร์คก๊าศปกคลุม หรือการเชื่อมมิก/แมก ได้ เพราะการเชื่อมที่กระทำภายใต้จุดหลอมเหลวของวัสดุมักไม่ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะหรือข้อบกพร่องอื่นๆ ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลงได้ ดังเช่นการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงที่ยอมรับได้ [3]



รอยต่อวัสดุต่างชนิดที่ได้รับความสนใจในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันมีหลายชนิด หนึ่งในนั้นคือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งในการนำมาใช้งานนั้น ผู้คิดค้นมีจุดประสงค์เพื่อทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างรถยนต์ลดลง ทำให้เครื่องยนต์ใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ ประหยัดการใช้ น้ำมัน และส่งผลทางอ้อมต่อการรักษาสีเงาตัวถังที่ผ่านามีการรายงานผลการทดลองการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กที่นำเสนอคือ Fujimoto et al. [1] ได้รายงานการเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม 6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อ มีค่าใกล้เคียงกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด นอกจากนั้น Tanaka and Kumagai [2] ได้เชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่ออลูมิเนียม





6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะของปลายของตัวกวนที่สอดเข้าไปในรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียม และความเร็วยอบของตัวกวน พบว่ารอยต่อมีความแข็งแรงสูงสุด มีสารประกอบกึ่งโลหะก่อตัวขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงเนื่องจากรอยฉีกขาด (Fracture Path) ของรอยต่อไม่ได้เกิดขึ้นผ่านแนวนี้ Lin *et al.* [4-5] แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบการฉีกขาดของแนวเชื่อม ที่เกิดจากเชื่อมโดยเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงปากแบนและรูปทรงปากเอียง กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [6] ได้ประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจตุรรอยต่ออลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยทำการศึกษาคู่แปรประกอบไปด้วย ความเร็วรอบ ความเร็วสอด เวลากดแช่ และรายงานความแข็งแรงของรอยต่อที่มีค่าสูงกว่าอลูมิเนียมหลักที่ใช้ในการทดลอง

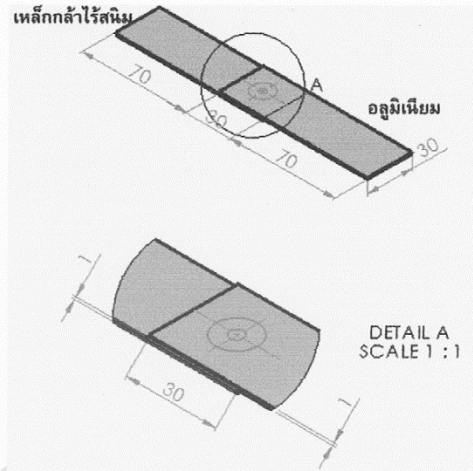
อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรการเชื่อมอื่นๆ ของ การเชื่อมเสียดทานแบบจตุรรอยต่ออลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ไม่ได้มีการรายงานไว้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ FSJ ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยทำการศึกษาคู่แปรการเชื่อมเพิ่มเติมที่ประกอบด้วย ระยะความลึกและรูปร่างของปากเครื่องมือเชื่อม ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกย เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงสุดที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## 2. การทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 แผ่นรีดความหนา 1 มม. ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ชิ้นทดสอบมีขนาดยาว 100 มม. และกว้าง 30 มม. โดยทิศทางของการรีดขนานด้านยาวของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2

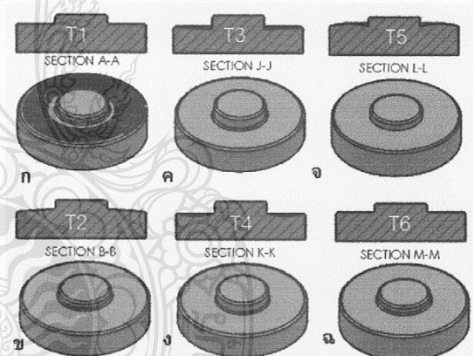
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและความต้านทานแรงดึงของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุ	อลูมิเนียม	เหล็ก
Fe	-	สมมูล
Al	สมมูล	-
C	-	0.05
S	-	0.004
Cr	-	18.17
Si	<0.95	0.384
N	-	0.037
Mn	<0.05	1.042
Ni	-	8.070
P	-	0.028
Cu	0.05-0.20	-
Zn	<0.10	-
ความต้านทานแรงดึง	164	520



รูปที่ 2 การจัดวางชิ้นทดสอบรอยต่อเกยในการทดลอง

แผ่นอลูมิเนียมวางต่อเกยอยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 30 มม. แผ่นวัสดุทั้งสองถูกยึดในอุปกรณ์จับยึด (Jig) ที่ยึดแน่นบนแท่นเคลื่อนที่ของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3 รูปฉายด้านข้างและด้านบนของเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงปากต่างๆ : (ก) เครื่องมือเชื่อม T1 (ข) เครื่องมือเชื่อม T2 (ค) เครื่องมือเชื่อม T3 (ง) เครื่องมือเชื่อม T4 (จ) เครื่องมือเชื่อม T5 (ฉ) เครื่องมือเชื่อม T6

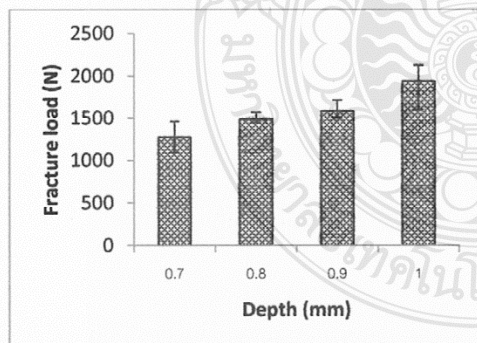
เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 มีตัวกวนทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. มีรูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3 เครื่องมือเชื่อม T1 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อมเป็นเก็ลียวกันหอย มีระยะพิท 0.29 มม. เครื่องมือเชื่อม T2 และ T3 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะเอียงออกและเอียงเข้า ด้วยมุม 4 องศา เครื่องมือเชื่อม T4 และ T5 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อมโค้งเว้าเข้าและนูนออก ด้วยรัศมี 2 มม. และเครื่องมือเชื่อม T6 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อมแบนเรียบ หมุนด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ความเร็วใน



การสอดตัวกวนจากผิวด้านบนของอลูมิเนียมมีค่า 8 มม. ต่อหน้าที่ ที่ระยะความลึกจากผิวด้านบนของแผ่นอลูมิเนียม 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 มม. ตามลำดับ ตัวกวนถูกสอดเข้าไปในแนวเชื่อมผ่านแผ่นอลูมิเนียม จนกระทั่งปลายตัวกวน ถึงระยะความลึกที่กำหนด ตัวกวนจะถูกกดแซ่ ที่ระยะความลึกต่างๆ เป็นเวลาเวลา 3 วินาที ก่อนจะถูกดึงออกจากแนวเชื่อม รอยต่อที่ได้จากเชื่อมนำไปทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อแยกโดยการดึงเดือนสภาวะละ 5 ชั้นทดสอบแล้วหาค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่ได้ และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่เกิดการเชื่อม

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อแยกและระยะความลึกในการเชื่อมของตัวกวนจากผิวด้านบนอลูมิเนียม โดยใช้เครื่องมือเชื่อม T6 ที่มีรูปทรงของปากแบนเรียบในการทดลองใช้ความเร็วรอบในการเชื่อม 3000 รอบต่อหน้าที่ความเร็วในการกดตัวกวน 8 มม. ต่อหน้าที่ เวลาที่ใช้ในกดแซ่ตัวกวน 3 วินาที ที่ระยะความลึก 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 มม. ผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะความลึกของตัวกวนจากผิวอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงของรอยต่อเชื่อมสูงสุดที่ระยะความลึก 1.0 มม. จากผิวอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 1935 นิวตัน หรือ มีค่าประมาณ 154 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อระยะความลึกลดลงความแข็งแรงของรอยต่อลดลง มีสาเหตุมาจากความร้อนเสียดทานที่บริเวณขอบเขตระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม (Interface) ไม่เพียงพอ ทำให้การเชื่อมยึดระหว่างวัสดุทำได้ไม่ดี จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะความลึก 1.0 มม. เป็นสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดสามารถทำให้เกิดรอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงได้

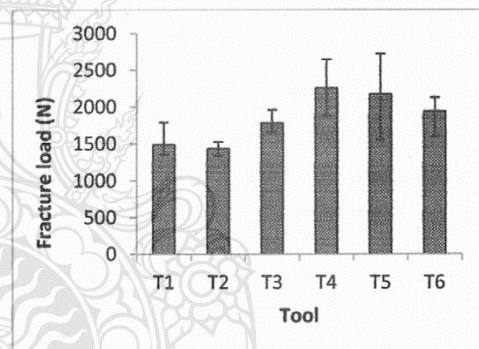


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อกับระยะความลึกในการเชื่อมจากผิวอลูมิเนียม

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อกับเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงปากลักษณะต่างๆ ของการเชื่อมที่ระยะขอบเขตระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ผลการ

ทดสอบความแข็งแรงดึงเดือนพบว่า การเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีรูปทรงปากโค้งเว้า ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด เท่ากับ 2252 นิวตัน หรือประมาณ 179 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าความแข็งแรงดึงเดือนของอลูมิเนียมผสม AA1100 ดังแสดงค่าไว้ในตารางที่ 1 ขณะที่การเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 ความแข็งแรงต่ำสุดที่ 1433 นิวตัน หรือ ประมาณ 114 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าความแข็งแรงของอลูมิเนียม

เมื่อพิจารณาลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อม ที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด พบว่ามีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุ เนื่องจากรับแรงดึงได้มากกว่า โดยลักษณะการฉีกขาดของรอยต่อไม่ได้เกิดผ่านบริเวณการเชื่อม แต่เกิดในอลูมิเนียมที่เป็นวัสดุหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 ที่ให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุด พบว่ามีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าวัสดุหลัก เนื่องจากรอยเชื่อมไม่สามารถรับแรงดึงได้ โดยเกิดการฉีกขาดบริเวณรอบ ๆ จุดเชื่อมที่ถูกดึงออกมา (Pulled out fracture) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) รอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรอยต่อจากการเชื่อม FSSW [4-5] ของอลูมิเนียม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อและรูปทรงปากเครื่องมือเชื่อม



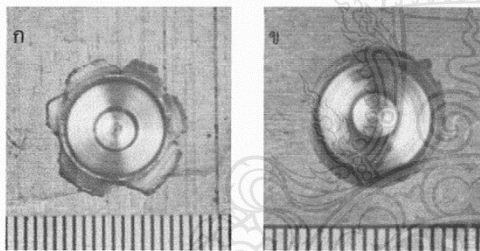
รูปที่ 6 การฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงดึงเดือน: (ก) รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงสุด และ (ข) รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำสุด



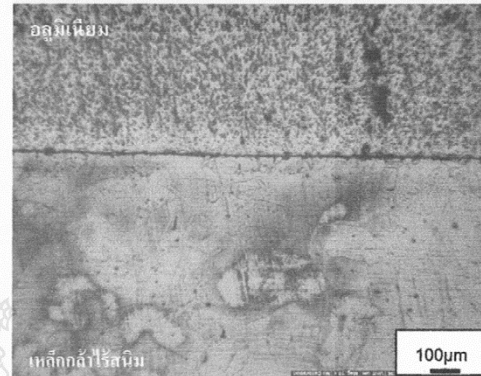
6111-T4 ซึ่งรอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำจะเกิดการฉีกขาดรอบ ๆ แนวเชื่อม ขณะที่รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงจะเกิดการฉีกขาดผ่านวัสดุอลูมิเนียม

ลักษณะรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงต่ำสุด และรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงสูงสุด ดังแสดงดังรูปที่ 7 รอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 มีค่าความแข็งแรงต่ำ อลูมิเนียมสันออกมาบริเวณขอบรอยเชื่อมมากจนมีลักษณะเป็นครีบริบรอบ ๆ รอยเชื่อม เนื่องจากบ่ามีรูปร่างเอียงออก ทำการไหลของอลูมิเนียมจะไหลขึ้นสู่ด้านบนของผิววัสดุ ทำให้การผสมของวัสดุเกิดได้น้อย เมื่อวัดความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.56 มม. แสดงดังรูปที่ 8 และ รอยเชื่อมทำการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงสุด บริเวณขอบรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบ เนื่องจากลักษณะบ่าที่โค้งเว้าเข้า ทำให้อลูมิเนียมจะไหลขึ้นบริเวณตัวกวนและไหลลงบริเวณใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อม เมื่อวัดความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างบ่ามีค่า 0.76 มม. ซึ่งมากกว่าความหนาของอลูมิเนียมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T6 จากผลการทดลองที่ได้คล้ายกับ Shigeki [7] ที่รอยเชื่อมจากเชื่อมด้วยเครื่องมือที่มีรูปร่างบ่าเอียงออกมีความแข็งแรงน้อยกว่ารูปร่างบ่าแบนเรียบและ รอยเชื่อมที่ได้จาก

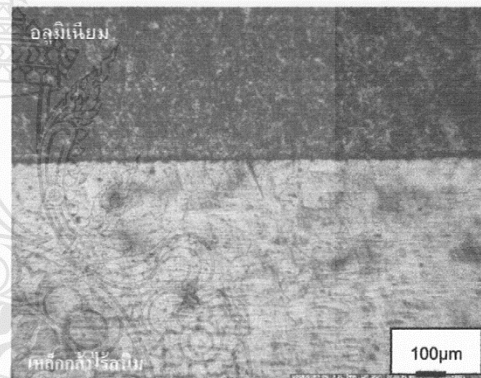
เครื่องมือเชื่อมที่มีรูปร่างบ่าเข้ามีความแข็งแรงมากกว่ารูปร่างบ่าแบนเรียบ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความหนาของอลูมิเนียมที่ด้านล่างของบ่าของเครื่องมือเชื่อม มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ แต่สาเหตุที่แท้จริงควรมีการศึกษาต่อไป



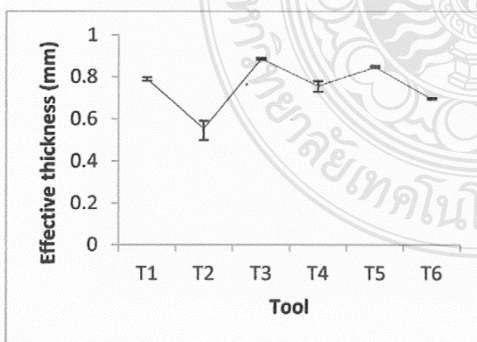
รูปที่ 7 ลักษณะรอยเชื่อมชั้นงานของ (ก) รอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงต่ำสุด (ข) รอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงสูงสุด



(ก) เครื่องมือเชื่อม T2



(ข) เครื่องมือเชื่อม T4



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างบ่าเครื่องมือต่อชนิดของเครื่องมือเชื่อม

รูปที่ 9 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วย:(ก) เครื่องมือเชื่อม T2และ(ข) เครื่องมือเชื่อม T4

รูปที่ 9(ก) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคชั้นงานของการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 เกิดการเกาะยึดกันที่มีความแข็งแรงต่ำสุด จะเห็นการกระจายตัวของเกรนในเฟสอลูมิเนียม จะกระจายตัวห่างกว่า เกรนมีความหยาบ ขณะที่รอยเชื่อมจากเครื่องมือเชื่อม T4 ซึ่งเกิดการเกาะยึดกันที่มีความแข็งแรงสูงสุด ดังรูปที่9(ข) ที่การกระจายตัวของเกรนในเฟสอลูมิเนียมมีความหนาแน่น เม็ดเกรนละเอียดกว่า จึงทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า อย่างไรก็ตามกลไกการเกิด และลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นบริเวณการเชื่อมนี้ จำเป็นต้องศึกษาอย่างละเอียดด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Transmission Electron Microscope: TEM) หรือการวัดการหักเหของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) เพื่ออธิบายลักษณะการเกาะยึดต่อไป



#### 4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดกับรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะสึกกร่อนเชื่อมและลักษณะรูปทรงป่าของเครื่องมือเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- 1) รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเชื่อมติดกันและมีความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 179 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
- 2) ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะความลึกของตัวกวนในการเชื่อมจากผิวอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น
- 3) การเชื่อมที่ระยะขอบเขตระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมจะให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด
- 4) เครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีรูปทรงของป่าเว้า รัศมี 2 มม. เป็นเครื่องมือเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณและครูอาจารย์ สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงาน ภาค 8 นครสวรรค์ คุณสุรียา ประสบทอง และบุคลากร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสามชุก ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และช่วยเหลือในการจัดทำงานวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Fujimoto, S. Koga, R. Ohashi and K. Fukuhara. "Friction Spot Joining for Automotive Industry." Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 173-179.
- [2] K. Tanaka and M. Kumagai. "Dissimilar Joining of Aluminum Alloy and Steel Sheets by Friction Stir Spot Welding." Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 181-189.
- [3] M. Fujimoto, S. Koga, R. Ohashi and K. Fukuhara. "Friction Spot Joining for Automotive Industry." Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 173-179.
- [4] Lin, P.-C., Pan, J., Pan, T., 2008a. 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 30,74-89.
- [5] Lin, P.-C., Pan, J., Pan, T., 2008b. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear

specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2. Welds made by a flat tool. International Journal of Fatigue 30, 90-105.

- [6] กิตติพงษ์ กิมพะงษ์ "การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดของรอยต่ออลูมิเนียมผสมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2552
- [7] Shigeki Hirasawa "Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spotwelding using particle method" Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 1455-1463

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอดิศร เปลี่ยนดิษฐ
วัน เดือน ปีเกิด	11 มีนาคม 2518
ที่อยู่	40/2 ม.5 ตำบลเที่ยงแท้ อำเภอสรรคบุรี จังหวัดชัยนาท 17140
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน	ตำแหน่งครูชำนาญการ แผนกวิชาช่างกล โรงงาน วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท พ.ศ. 2551 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	086-655-0808
อีเมล	pliandit_9@yahoo.com

