

อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม AA 6063-T1

**EFFECT OF FSW STIRRER GEOMETRICS ON AA6063-T1
ALUMINUM ALLOY BUTT JOINT PROPERTIES**



สมศักดิ์ ศรีป่าหมาก
SOMSAK SRIPAMAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2552

อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม AA 6063-T1



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

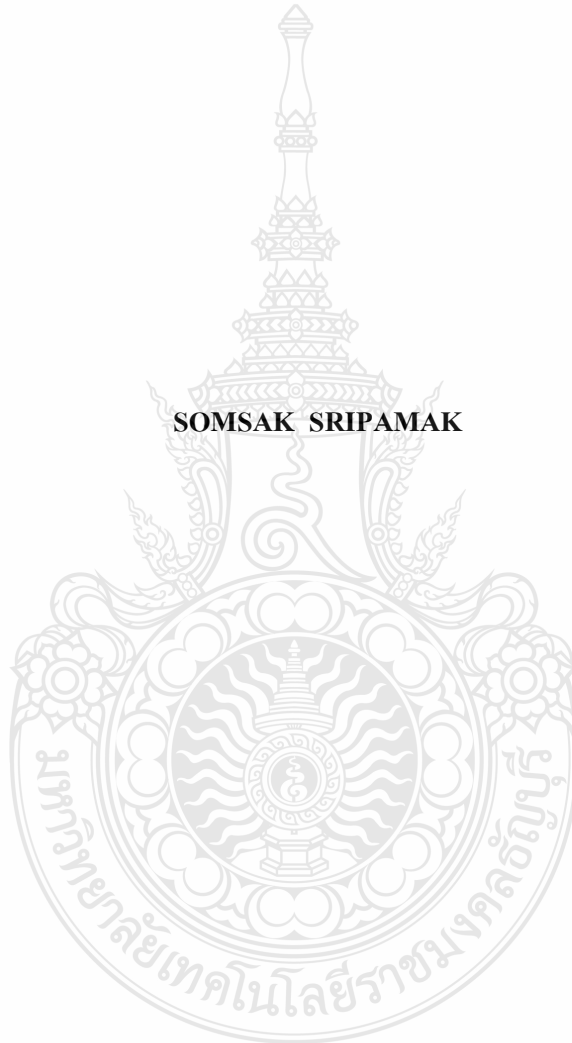
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ชัยบุรี

พ.ศ. 2552

**EFFECT OF FSW STIRRER GEOMETRICS ON AA6063-T1
ALUMINUM ALLOY BUTT JOINT PROPERTIES**

SOMSAK SRIPAMAK



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER ENGINEERING
IN INDUSTRIAL ENGINEERING DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

2009

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้า และวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ใน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายสมศักดิ์ ศรีป่าหมาก





ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม AA 6063-T1 EFFECT OF FSW STIRRER GEOMETRICS ON AA6063-T1 ALUMINUM ALLOY BUTT JOINT PROPERTIES
ชื่อนักศึกษา	นายสมศักดิ์ ศรีป่าหมาก
รหัสประจำตัว	124970404012-2
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
วัน เดือน ปี ที่สอบ	4 ตุลาคม 2552 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ	ห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิวกร อ่างทอง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกรียงไกร แก้วตระกูลพงษ์)

..... กรรมการ

(ดร. ศิริชัย ต่อสกุล)

..... กรรมการ

(ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม AA 6063-T1
นักศึกษา	นายสมศักดิ์ ศรีป่าหมาก
รหัสประจำตัว	124970404012-2
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา เรื่อง อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม AA 6063-T1 โดยเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เพื่อพัฒนาเครื่องมือในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ซึ่งใช้เครื่องมือในการเชื่อม คือ ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ ตัวกวนชนิดรูปทรงแยผิวเรียบ ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา และตัวกวนชนิดรูปทรงแยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา และหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ในการทดลองแกนหมุนของเครื่องมือเชื่อมทำมุมเอียง 2 องศาับชิ้นงานเชื่อมในแนวตั้ง ตัวกวนมีความเร็วรอบคงที่ ที่ 2000 รอบ/นาที โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อม (อัตราป้อน) ตั้งแต่ 50 จนถึง 200 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งปรับเพิ่มครั้งละ 25 มิลลิเมตร/นาที ในการทดลองจะทดสอบความเหมาะสมของความเร็วในการเดินเชื่อมดังกล่าวขึ้นต้นด้วยค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของแนวเชื่อม และการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบผลของตัวกวนรูปร่างแบบต่างๆ

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ พบว่า ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา และตัวกวนชนิดรูปทรงแยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา มีความเหมาะสม ในการใช้งาน เนื่องจากค่าตัวแปร ทั้งสองตัวแปรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุหลัก ในขณะที่ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน เมื่อพิจารณาถึง ค่าความเร็วในการเดินเชื่อม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและตัวกวนชนิดรูปทรงแยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ด้วยค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 162.08 MPa ที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม 100

มิลลิเมตร/นาทีก และค่าเปอร์เซ็นต์การขีดตัวสูงสุด เท่ากับ 26.07 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะความเร็วในการ
เดินเชื่อม 75 มิลลิเมตร/นาทีก

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน; รอยต่อชน; อลูมิเนียม; ความเร็วเดินแนวเชื่อม;



Thesis Title: Effect of FSW Stirrer Geometrics on AA6063-T1 Aluminum Alloy Butt Joint Properties

Student Name: Mr. Somsak Sripamak

Student ID: 124970404012-2

Degree Award: Master of Engineering

Study Program: Industrial Engineering

Academic Year: 2009

Thesis Advisor/s: Dr. Kittipong Kimapong

ABSTRACT

This thesis studies the effect of friction stir welding parameters such as tool pin profile on joining properties of AA 6063-T1 aluminum alloy pieces. Six different pin profiles (cylinder with smooth surface, cone with smooth surface, cylinder with tapered surface rotating clockwise, cylinder with tapered surface rotating counter-clockwise, cone with tapered surface rotating clockwise, and cone with tapered surface rotating counter-clockwise) were used to fabricate the joints

During this study, a rotational speed of 2000 rpm and seven feeding speeds ranging from 50 to 200 mm/min (a 25 mm/min increment) were used to fabricate the joints. The work pieces were horizontally set, and the rotational axis of the tool was tilted 2 degrees from the vertical axis. Tensile strength and percent elongation of the joints were measured using the root bend test. Microstructure analysis of the joints was performed using Scanning Electron Microscopy (SEM)

From this study, the following results were obtained. We found that only four (out of six) pin profiles are suitable for making joint via friction stir welding process because the joints formed using these pin profiles have tensile strength and percent elongation higher or equal to those of the original AA 6063-T1 aluminum alloy pieces with no joint. The four pin profiles are: cylinder with tapered surface rotating clockwise, cylinder with tapered surface rotating counter-clockwise, cone with tapered surface rotating clockwise, and cone with tapered surface rotating counter-clockwise. Among these, the tool pin having cylinder with tapered surface rotating counter-clockwise profile requires a slower feeding speed than the others to form high quality joints, and is considered to be the most suitable pin profile for use in the friction stir welding process. The highest tensile strength of 162.08

MPa and the highest percent elongation of 26.07% were obtained from the joints formed using this pin profile with feeding speeds of 100 mm/min and 75 mm/min, respectively

Keyword: Frictions stir welding; Butt joint; Aluminum alloy; Welding speed



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการดูแลช่วยเหลือจาก ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความเมตตาดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิวกร อ่างทองและดร. ศิริชัย ต่อสกุล

ขอขอบพระคุณ อาจารย์จกมล สุภารัตน์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้ตรวจเครื่องมือในการวิจัยและดูแลเรื่องการวิเคราะห์ข้อมูลในครั้งนี้ รวมทั้งยังให้การแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และขอขอบพระคุณ อาจารย์กวิพงษ์ นิสสัยพันธ์ ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนและได้ให้เวลากับผู้เขียนในการทำวิทยานิพนธ์และผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณอาจารย์บุญตง จงกลณี ที่ให้ความช่วยเหลือการทำเครื่องมือในการเชื่อมและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการงานทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ท้ายสุด ขอขอบพระคุณครอบครัวข้าพเจ้า ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน ช่วยเหลือและเติมเต็ม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สมศักดิ์ ศรีป่าหมาก

4 ตุลาคม 2552



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กระบวนการเชื่อมโลหะ	5
2.2 ประเภทของการเชื่อม	6
2.3 รูปแบบต่างๆ ในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน	7
2.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมต่อโลหะแบบแรงเสียดทาน	9
2.5 ข้อดีของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน	9
2.6 สมบัติของโลหะทั่วไปที่มีผลต่อการเชื่อม	10
2.7 วัสดุอลูมิเนียม (Aluminum)	10
2.8 การจำแนกชนิดของอลูมิเนียม	13
2.9 สัญลักษณ์เพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของอลูมิเนียมอ่อน (Wrought Aluminum)	15
2.10 การเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม	16
2.11 ความสามารถในการเชื่อม	17
2.12 สมบัติของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1	18
2.13 การทดสอบแรงดึง	19
2.14 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความหมาย	21
2.15 การเตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค	22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 2 (ต่อ)	หน้า
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	32
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	32
3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย	33
3.3 เครื่องมือเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง	34
3.4 การสร้างเครื่องมือเชื่อม	35
3.5 การเตรียมชิ้นงานทดลอง	36
3.6 ขั้นตอนและวิธีการเชื่อมชิ้นทดลอง	38
3.7 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	39
3.8 การเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
4.1 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ	46
4.2 ตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ	50
4.3 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา	54
4.4 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา	61
4.5 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา	65
4.6 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา	72
4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของตัวกวนรูปร่างชนิดต่างๆ	78
4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของตัวกวนรูปร่างชนิดต่างๆ	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	80
5.1 สรุปผลการทดลอง	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก	85
ก ผลการทดสอบ	85
ข ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์	92
ประวัติผู้เขียน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของกระบวนการเชื่อมต่อโลหะ	7
2.2 สมบัติทางฟิสิกส์	12
2.3 สมบัติทางกล	13
2.4 กลุ่มตัวเลข 4 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอลูมิเนียมขึ้นรูป	14
2.5 กลุ่มตัวเลข 2 และ 3 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอลูมิเนียมหล่อ	15
2.6 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1	18
2.7 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1	18
ก. 1 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4	86
ก. 2 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4	86
ก. 3 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	87
ก. 4 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว กับชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	87
ก. 5 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวกับชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	88
ก. 6 แสดงข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	88
ก. 7 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก. 8 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063 –T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4	89
ก. 9 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	90
ก. 10 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวกับชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	90
ก. 11 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวกับชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	91
ก. 12 ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	1
1.2	กลไกการเกิดแนวเชื่อม	2
2.1	การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุน	7
2.2	การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น	8
2.3	การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้นของไทเทเนียมและเหล็กในบรรยากาศ	8
2.4	การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุนกวน	9
2.5	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง	20
2.6	โครงสร้างจุลภาค	22
2.7	ใบตัดอะบราซีฟ (Abrasive Cutoff Wheel)	23
2.8	ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นร้อน	24
3.1	การวางแผนการดำเนินงานในการทำการศึกษและจัดทำวิทยานิพนธ์	32
3.2	การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย	33
3.3	ลักษณะของตัวกวนชนิดรูปร่างแบบต่างๆ	34
3.4	ทิศทางการหมุนและมุมเอียงของตัวกวน	35
3.5	ส่วนต่างๆ ของเครื่องมือเชื่อม	36
3.6	ขนาดชิ้นงานและการต่อชน	36
3.7	อุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงานและแผ่นรองชิ้นงาน	37
3.8	การจับยึดชิ้นงาน	37
3.9	เครื่องกัดแบบอัตโนมัติ	38
3.10	การเชื่อมขึ้นทดลอง	38
3.11	ชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว	39
3.12	ขึ้นทดสอบแรงดึง (AWS - D 1.2)	39
3.13	ขึ้นทดสอบแรงดึงวัสดุหลัก	40
3.14	ลักษณะการวัดและการตัดขึ้นทดสอบแรงดึง	40
3.15	เครื่องตัดไมโครคัตเตอร์	41
3.16	การตัดชิ้นงานและการจับยึดชิ้นงาน	41
3.17	การตัดชิ้นงานทดสอบในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม	42
3.18	การทดสอบแรงดึง	42
3.19	การวัดขนาดความหนาและความกว้างของขึ้นทดสอบ	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.20	กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง	43
4.1	ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ค่า EP = จุดบกพร่องที่จุดสุดท้าย และค่า WP = จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยมิลลิเมตร)	46
4.2	ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ	47
4.3	ตำแหน่งการถีกขาดของชิ้นทดสอบด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ	48
4.4	โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	49
4.5	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ค่า EP = จุดบกพร่องที่จุดสุดท้าย และค่า WP = จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยมิลลิเมตร)	50
4.6	ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ	51
4.7	ตำแหน่งการถีกขาดของชิ้นทดสอบตัวกวนรูปกรวยผิวเรียบ	52
4.8	โครงสร้างมหภาคของชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	53
4.9	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ค่า EP = จุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายและค่า WP = จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยมิลลิเมตร)	54
4.10	ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา	55
4.11	ตำแหน่งการถีกขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา	56
4.12	โครงสร้างมหภาคของชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	57
4.13	พื้นที่ที่เกิดการกวนและพื้นที่ของอลูมิเนียมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 พื้นที่ของเนื้อลูมิเนียมเค็มที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณ (ก) (กำลังขยาย 600 เท่า)	58
4.15 ขอบเขตระหว่างพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่ของเนื้อลูมิเนียมในบริเวณ (ข) (กำลังขยาย 600 เท่า)	59
4.16 พื้นที่ของเนื้อลูมิเนียมที่เกิดการกวนของเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ค) (กำลังขยาย 600 เท่า)	59
4.17 ขอบเขตระหว่างพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่ของเนื้อลูมิเนียมที่เกิดการกวนของเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ง) (กำลังขยาย 600 เท่า)	60
4.18 ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ค่า EP = จุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายและค่า WP = จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (มิลลิเมตร)	61
4.19 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา	62
4.20 ตำแหน่งการฝึกขนาดของชิ้นทดสอบตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา	63
4.21 โครงสร้างมหภาคของชิ้นทดลองเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างๆ	64
4.22 ผิวหน้าของแนวเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	65
4.23 การไหลวนของเนื้อวัสดุที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา	65
4.24 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา	66
4.25 บริเวณจุดขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	67
4.26 โครงสร้างมหภาค ของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอก แบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	68
4.27 พื้นที่ที่เกิดการกวนและพื้นที่ของวัสดุหลักที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง	69
4.28 พื้นที่ของเนื้อวัสดุหลักที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณ (ก) (กำลังขยาย 600 เท่า)	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.29	พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่การไหลของเนื้อวัสดุหลัก ในบริเวณ (ข) (กำลังขยาย 600 เท่า)	70
4.30	พื้นที่ของเนื้อวัสดุหลักที่เกิดการกวนของเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ค) (กำลังขยาย 600 เท่า)	70
4.31	พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่ของเนื้อวัสดุหลัก ที่เกิดการกวนใต้บ่าเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ง) (กำลังขยาย 600 เท่า)	71
4.32	ผิวหน้าของแนวเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบ มีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	72
4.33	การไหลวนของเนื้อวัสดุที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา	72
4.34	ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้จากการใช้ความเร็วในการ เดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็ มนาฬิกา	73
4.35	บริเวณจุดขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	74
4.36	โครงสร้างมหภาค ของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ	75
4.37	พื้นที่ที่เกิดการกวนและพื้นที่ของอลูมิเนียมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง	75
4.38	พื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมเดิมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณ (ก) (กำลังขยาย 600 เท่า)	76
4.39	พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่การไหลของเนื้ออลูมิเนียม ในบริเวณ (ข) (กำลังขยาย 600 เท่า)	76
4.40	พื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมที่เกิดการกวนของเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ค) (กำลังขยาย 600 เท่า)	77
4.41	พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนในการเชื่อมและพื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมที่เกิดการกวน ใต้บ่าเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ง) (กำลังขยาย 600 เท่า)	77
4.42	การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ ทุกสภาวะ ความเร็วในการเดินเชื่อม	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43	
การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม	79



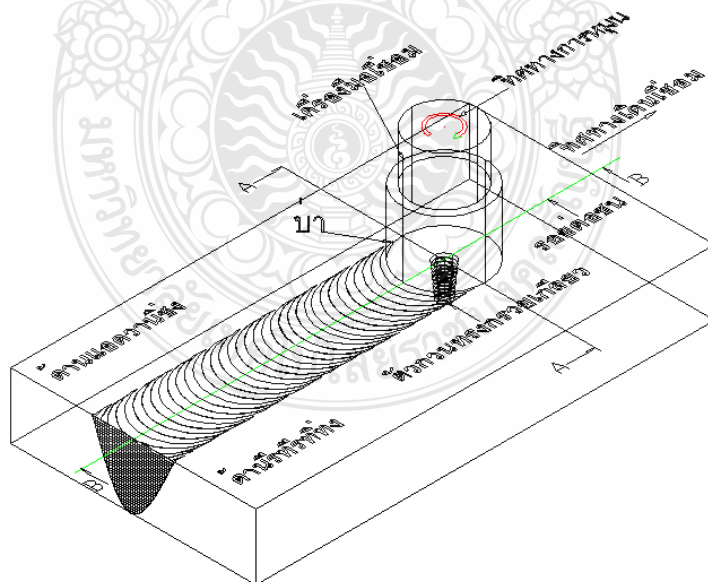
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

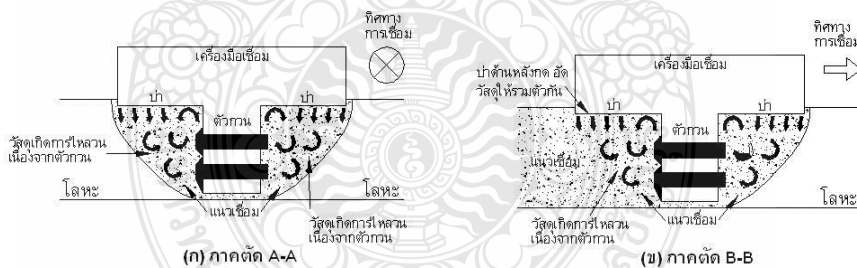
ในงานทางด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมวัสดุประเภทโลหะ โดยเฉพาะในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา มักพบปัญหาของจุดบกพร่องในแนวรอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาค เมื่อเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย เนื่องจากกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา เช่น อลูมิเนียมผสม จะมีจุดหลอมเหลวต่ำ หลอมละลายง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) เช่น อลูมิเนียมผสม [1] เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย FSW สามารถทำให้คุณสมบัติของแนวเชื่อมมีค่าสูงในบริเวณแนวเชื่อม (Welded Zone) กรรมวิธี FSW นี้ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบินรถยนต์และเรือเดินสมุทร [2] และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงไว้ในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

ตัวกวน (Probe or Stirrer) ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อม (Rotating Tool) สอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งแสดงภาคตัด A-A และ B-B ในรูปที่ 1.2 (ก) วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดขยอนลงมา เนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้น ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ผู้คิดค้นกำหนดชื่อกระบวนการว่า “Friction Stir Welding” อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายในบทความนี้เป็นเบื้องต้น ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมาสู่ด้านหลังตามทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทริททิง และบางส่วนของไหลจากด้านหลังสู่ด้านหน้าทางด้านแอดวานซึ่งดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ด้านรีทริททิง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซึ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนขนานกับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนและตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม จะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ก) และ 1.2 (ข)



รูปที่ 1.2 กลไกการเกิดแนวเชื่อม

ที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ FSW ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรดต่างๆ มากมาย เช่น การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียมผสม A356, อลูมิเนียมผสม AA2014-T351 [3], อลูมิเนียมผสม AA5083 [4], อลูมิเนียมผสม AA6082 [5], อลูมิเนียมผสม Al-Li-Cu [6] เป็นต้น และการศึกษาเหล่านี้ได้รายงานความแข็งแรงของรอยต่อชนเหล่านี้มีค่าสูงมากกว่าอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในงานเชื่อม อย่างไรก็ตามในกรณีอลูมิเนียมผสม 6063-T1 ซึ่งเป็นอลูมิเนียมที่สามารถผลิตและใช้งานในประเทศไทยนั้น ไม่ได้มีรายงานไว้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบ

กวนในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 โดยเบื้องต้นทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างตัวกวนที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามในการศึกษาการต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ที่ผ่านมาตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ รูปกรวยกลมผิวเรียบ และตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการเชื่อมต่อชนอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อที่คาดว่ากรวมตัวกันระหว่างวัสดุจะสามารถทำได้ดีขึ้นและทำให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการเชื่อมอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนและทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่ดีที่สุดมาตรวจสอบและเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยต่อชนของอลูมิเนียมผสม AA6063 - T1 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่มีตัวกวนรูปร่างแบบต่างๆ ในการเชื่อมต่อชนอลูมิเนียมผสม AA6063-T1

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างแบบต่าง ๆ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

เพื่อทดสอบให้ได้แนวเชื่อมที่มีสมบัติทางกลสูงกว่าหรือเท่ากับเนื้อวัสดุหลัก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมต่อชนทำารอบอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ความหนา 6.3 มิลลิเมตร

1.4.2 ทำการศึกษาอิทธิพลและเปรียบเทียบผลค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของตัวกวนชนิดต่างๆ ประกอบด้วย ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ ตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา

- 1.4.3 ทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่ประกอบไปด้วย
 - ก. ความเร็วรอบของตัวกวน 2000 รอบต่อนาที
 - ข. ความเร็วในการเดินเชื่อม 50-200 มิลลิเมตรต่อนาที
- 1.4.4 ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน
 - ก. ทดสอบความแข็งแรงดึง
 - ข. ทดสอบเปอร์เซ็นต์การยึดตัว
- 1.4.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบ

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.5.1 เพื่อศึกษารูปร่างตัวกวนรูปแบบต่างๆ และตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด
- 1.5.2 เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนให้ได้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ ในอุตสาหกรรมของประเทศไทย
- 1.5.3 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนกับวัสดุอื่นต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเอกสาร ตำราและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องครอบคลุมหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการเชื่อมโลหะ

การเชื่อมโลหะ คือ ขบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลายและการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อน หรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม

วิกิพีเดีย สารานุกรมอิสระ ให้นิยามการเชื่อมว่า เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุ ส่วนใหญ่เป็นโลหะและพลาสติก โดยให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลายและการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อน หรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม ซึ่งตรงข้ามกับการบัดกรีอ่อนและการบัดกรีแข็งซึ่งไม่มีการหลอมละลายของชิ้นงานชิ้นงาน มีแหล่งพลังงานหลายอย่างสำหรับนำมาใช้ในการเชื่อม เช่น การใช้ความร้อนจากเปลวแก๊ส การอาร์คโดยใช้กระแสไฟฟ้า ลำแสงเลเซอร์ การใช้โอเล็คตรอนบีม การเสียดสี การใช้คลื่นเสียง เป็นต้น ในอุตสาหกรรมมีการนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น การเชื่อมในพื้นที่โล่ง พื้นที่อับอากาศ การเชื่อมใต้น้ำ การเชื่อม มีอันตรายเกิดขึ้นได้ง่าย จึงควรมีความระมัดระวังเพื่อป้องกันอันตราย เช่น ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าความร้อน สะเก็ดไฟ ค้อนเชื่อม แก๊สพิษ รังสีอาร์ค ชิ้นงานร้อน ฝุ่นละออง ในยุคเริ่มแรกจนถึงศตวรรษที่ 19 มีการใช้งานเฉพาะการเชื่อมทุบ (Forge Welding) เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อโลหะ เช่น การทำดาบในสมัยโบราณ วิธีนี้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงสูงและโครงสร้างของเนื้อรอยเชื่อมมีคุณภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจ แต่มีความล่าช้าในการนำมาใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม หลังจากนั้นได้มีการพัฒนามาสู่การเชื่อมอาร์คและการเชื่อมโดยใช้เปลวแก๊สออกซิเจนและหลังจากนั้นมีการเชื่อมแบบความดันตามมา เทคโนโลยีการเชื่อม ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในศตวรรษที่ 20 ซึ่งอยู่ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่ๆ ได้มีการเร่งพัฒนาเพื่อรองรับต่อการสู้รบในช่วงเวลานั้น เพื่อทดแทนการต่อโลหะแบบเดิม เช่น การใช้หมุดย้ำซึ่งมีความล่าช้าอย่างมาก ขบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) เป็นกระบวนการหนึ่งพัฒนาขึ้นมาในช่วงนั้นและกระทั่งปัจจุบัน ยังคงเป็นกรรมวิธีที่ใช้งานกันมากที่สุดในประเทศไทยและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย [7]

ส่วน อนันต์ พรหมสิทธิบุตร กล่าวว่า การเชื่อมโลหะ (Welding) คือ กรรมวิธีการทำให้ติดกันโดยการให้ความร้อนหรือแรงกด หรือ ทั้งความร้อนและแรงกดร่วมกันแก่บริเวณเชื่อม จนกระทั่งโลหะนั้นติดเป็นชิ้นเดียวกัน

โดยสรุป การเชื่อม (Welding) คือ ศาสตร์และศิลป์แขนงหนึ่งที่มีบทบาทมากในวงการอุตสาหกรรม งานเชื่อม มีอยู่ทุกที่ทั่วโลก บนบก ใต้น้ำ แม้กระทั่งในอวกาศ ศาสตร์และศิลป์ที่มีอยู่ในงานเชื่อมนั้นมีอยู่มากมาย มีทั้งลวดเชื่อม ช่างเชื่อม รอยต่องานเชื่อมต่างๆ การตรวจสอบงานเชื่อม เป็นต้น [8]

2.2 ประเภทของการเชื่อม

ความร้อนที่ให้แก่งานนั้นอาจได้จากพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานคลื่นเสียง หรือพลังงานแสงขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกันไป หากจะแบ่งประเภทของการเชื่อมต่อโลหะนั้นอาจแบ่งได้ [8] ดังนี้

2.2.1 การเชื่อมหลอม (Fusion Welding) เป็นการเชื่อมประสานโลหะให้ติดกันโดยให้ความร้อนแก่งานจนชิ้นงานหลอมละลายประสานตัวติดเป็นชิ้นเดียวกัน ความร้อนอาจได้จากการอาร์ค (Arc) หรือการเผาไหม้จากแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจน ความร้อนจากการอาร์คจะรวมถึงวิธีการซึ่งอิเล็กโทรดเกิดการอาร์คด้วยตัวเองแล้วหลอมละลายเป็นแนวเชื่อมพร้อมเนื้องานและรวมถึงวิธีที่อิเล็กโทรดทำให้เกิดการอาร์คเพียงอย่างเดียวแล้วใช้ลวดเชื่อม (Filler Rod) ตัวหลอมละลายเติมลงไปในการเชื่อม

2.2.2 การเชื่อมด้วยความดัน (Welding with Pressure) เป็นการเชื่อมโลหะโดยใช้แรงดัน (Pressure) เข้าช่วยโดยในขณะที่ชิ้นงานได้รับความร้อนจนเกือบหลอมละลายหรืออยู่ในภาวะพลาสติก (Plastic Stage) แล้วใช้แรงกดจนชิ้นงานประสานติดเป็นเนื้อเดียวกัน

2.2.3 การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน (Friction Welding) การเชื่อมโลหะวิธีนี้ จัดอยู่ในกลุ่มการเชื่อมด้วยความดัน (Welding with Pressure) โดยความร้อนนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อนที่รอยต่อของชิ้นงานโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อนจากแหล่งอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องกับบริเวณรอยต่อของชิ้นงานเลย การเชื่อมแบบแรงเสียดทานนี้ทำได้โดยการยึดจับชิ้นงานชิ้นหนึ่งซึ่งอยู่กับที่ และสัมผัสกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่หมุน ภายใต้แรงกดที่คงที่หรือค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของชิ้นงานทั้งสองสูงพอที่จะทำให้ชิ้นงานทั้งสองเชื่อมติดกันได้ จึงหยุดหมุน พร้อมทั้งเพิ่มแรงกดเพื่อให้ชิ้นงานทั้งสองเชื่อมติดกันได้ดียิ่งขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ไม่ถึงอุณหภูมิหลอมละลาย การเชื่อมจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิพลาสติก (Plastic Temperature Range)

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานนี้สามารถใช้ได้กับโลหะผสมเหล็ก (Ferrous Alloys) และโลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Alloys) หลายชนิดและยังสามารถใช้เชื่อมโลหะสองชิ้นที่มีคุณสมบัติ

ทางกลและความร้อนที่ต่างกันมากได้ โลหะบางชนิดที่สามารถเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้อาจไม่สามารถเชื่อมด้วยวิธีอื่น เพราะจะเกิดการจัดเรียงตัวของเฟสที่มีความเปราะ (Brittle Phase) ขึ้น ซึ่งทำให้รอยเชื่อมไม่แข็งแรง ในขณะที่การเชื่อมแบบแรงเสียดทานนั้นมีอุณหภูมิไม่ถึงจุดหลอมเหลวและใช้เวลาในการเชื่อมที่รวดเร็วจึงทำให้ชิ้นงานเหล่านั้นเชื่อมต่อกันได้

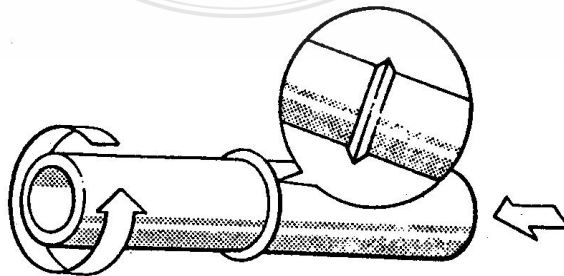
ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของกระบวนการเชื่อมต่อโลหะ [9]

แหล่งพลังงานที่ใช้	เชื่อมด้วยความดัน	เชื่อมหลอม
การเคลื่อนไหวย	เชื่อมแบบแรงเสียดทานเชื่อมแบบแรงระเบิด	
แก๊ส	เชื่อมอัดด้วยแก๊สเชื่อมอัดด้วยไฟ	เชื่อมแก๊ส
กระแสไฟฟ้า	เชื่อมจุด เชื่อมตะเข็บเชื่อมเฟลซ	เชื่อมอิเล็กทรอนิกส์
กระแสไฟฟ้า ผ่านเปลวอาร์ก	เชื่อมสลัก	เชื่อมไฟฟ้าด้วยรูปเชื่อมเชื่อมมิก เชื่อมทิก เชื่อมซับเมอร์จ เชื่อมพลาสมา
รังสี		เชื่อมด้วยรังสีเลเซอร์เชื่อมด้วยรังสีอิเล็กตรอน

2.3 รูปแบบต่างๆ ในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

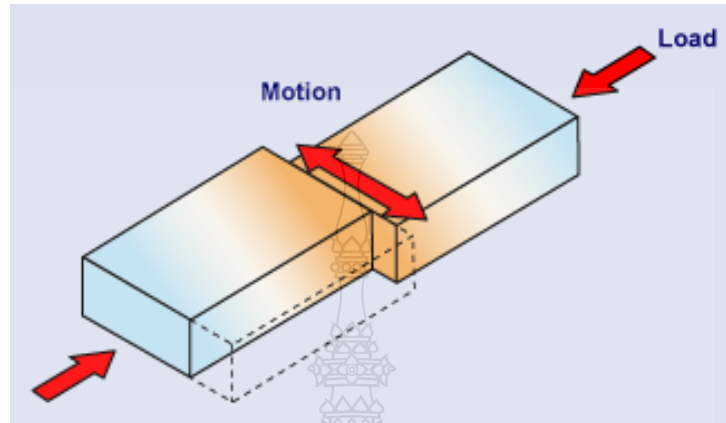
รูปแบบต่างๆ ในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน [10] ประกอบด้วย

2.3.1 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุน (Rotation Friction Welding) การเคลื่อนที่เสียดสีของผิวหน้าชิ้นงานนั้นอาจทำได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับรูปทรงของผิวหน้าชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ผิวหน้าจะมีลักษณะเป็นวงกลม การเคลื่อนที่เสียดสีกันของชิ้นงานทำได้โดยการหมุน พร้อมทั้งออกแรงกด ดังรูป 2.1

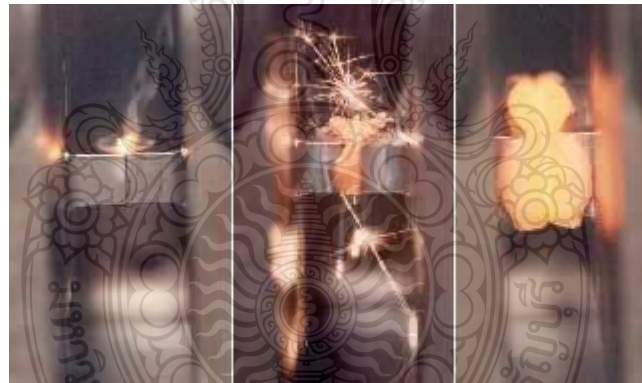


รูปที่ 2.1 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุน [11]

2.3.2 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น (Linear Friction welding) เป็นการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่เสียดกันของชิ้นงานทำได้โดยการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นพร้อมทั้งมีแรงกดจนเกิดความร้อนที่เพียงพอในการเชื่อมชิ้นงานทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกัน รูปที่ 2.3 แสดงการเชื่อมเสียดทานแบบเชิงเส้นระหว่างไทเทเนียมและเหล็ก

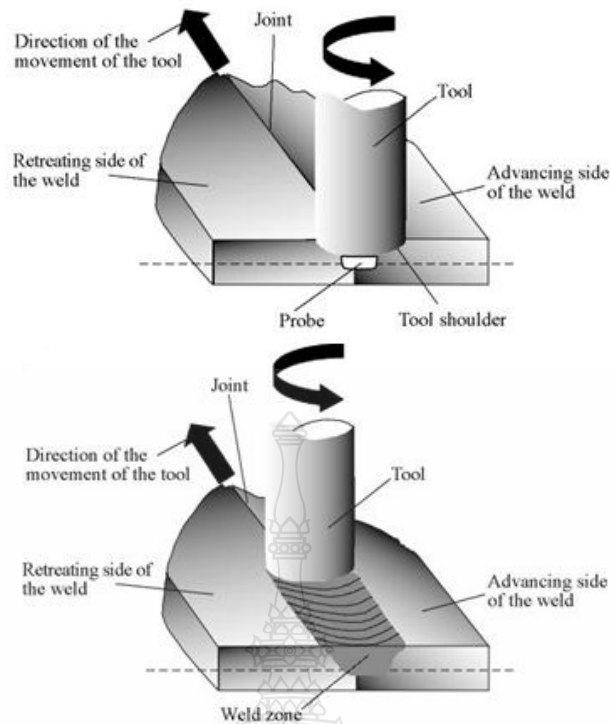


รูปที่ 2.2 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น [12]



รูปที่ 2.3 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้นของไทเทเนียมและเหล็กในบรรยากาศ [12]

2.3.3 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุนวน (Stir Friction Welding) โดยการนำชิ้นงานทั้งสองแผ่นวางใกล้กันแล้วใช้โลหะซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตัน หมุนแท่งโลหะให้ผิวหน้าของแท่งโลหะเคลื่อนที่เสียดสีกับบริเวณรอยต่อของโลหะแผ่นทั้งสอง จนเกิดความร้อนขึ้นเพียงพอที่จะทำโลหะแผ่นทั้งสองเชื่อมติดกันจากนั้นจึงออกแรงบีบอัดจากด้านข้างของแผ่นโลหะทั้งสองเพื่อให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุนวน [13]

2.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมต่อโลหะแบบแรงเสียดทาน

- 2.4.1 ความเร็วในการหมุนชิ้นงาน (Velocity)
- 2.4.2 ขนาดของแรงกดเสียดทาน (Frictional Force)
- 2.4.3 ขนาดของแรงกดอยู่ (Upset Force)
- 2.4.4 เวลาที่ใช้ในการหมุน (Frictional Time)
- 2.4.5 ขนาดพื้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน (Surface Area)
- 2.4.6 ชนิดของวัสดุชิ้นงานเชื่อม (Type of Material)
- 2.4.7 อุณหภูมิภายนอกขณะทำการเชื่อม (Temperature of Welding)

2.5 ข้อดีของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

- ข้อดีของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ประกอบด้วย [8]
- 2.5.1 ไม่จำเป็นต้องใช้ลวดเติม หรือก๊าซเฉื่อยในการเชื่อม
 - 2.5.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่ำทำให้มีผลผลิตจำนวนมาก
 - 2.5.3 สามารถเชื่อมวัสดุที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้
 - 2.5.4 รอยเชื่อมที่ได้มีความสะอาด
 - 2.5.5 พลังงานที่ใช้ในการเชื่อมต่ำจึงเป็นการประหยัดต้นทุนในการเชื่อม
 - 2.5.6 ไม่สร้างสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

2.6 สมบัติของโลหะทั่วไปที่มีผลต่อการเชื่อม

สมบัติของโลหะทั่วไปที่มีผลต่อการเชื่อม ประกอบด้วย [14]

2.6.1 จุดหลอมละลาย (Melting Point) เป็นสิ่งสำคัญต่อการเชื่อมมาก หมายถึง อุณหภูมิซึ่งทำให้โลหะหลอมละลายกลายเป็นของเหลว มีความสำคัญยิ่งโดยเฉพาะในการเชื่อมโลหะที่ไม่เหมือนกันเข้าด้วยกัน

2.6.2 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) คือ ความสามารถในการส่งกระจายความร้อนไปตามมวลของวัตถุนั้น มีความสำคัญต่อการเชื่อมเพราะโลหะชนิดหนึ่งอาจมีสมบัติในการนำความร้อนออกจากแนวเชื่อมไปได้เร็วกว่าโลหะอีกชนิดหนึ่ง

2.6.3 ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของโลหะ และจะบอกให้ทราบถึงปริมาณความร้อนที่ต้องการที่จะทำให้โลหะนั้นมีความร้อนจนถึงจุดหลอมละลาย

2.6.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัว (Co-efficient of Expansion) หมายถึง ความยาวที่เพิ่มขึ้นที่วัดได้จากการขยายตัวตามเส้นเมื่อโลหะได้รับความร้อนสัมประสิทธิ์การขยายตัวมีค่าเปลี่ยนแปลงได้กว้างมาก อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีการขยายตัวสูงมาก ดังนั้น ในการเชื่อมจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเครื่องมือสำหรับใช้ในการควบคุมการบิดงอหรือการหนีจากแนวเดิม

2.6.5 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) คือ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ โดยดึงให้ชิ้นทดสอบนั้นขาดออกจากกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบนั้นมีความแข็งแรงเท่ากับแรงที่ไปกระทำ

2.6.6 ความแข็ง (Hardness) ความแข็งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งการทดสอบหาความแข็งมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น บริเนล (Brinell) ร็อคเวล (Rockwell) วิคเกอร์ (Vicker) นูป (Knoop) และอื่นๆ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีความเกี่ยวพันกันและสามารถเปรียบเทียบกันได้

2.7 วัสดุอลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Al มวลของอะตอมเท่ากับ 26.98 ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเท่ากับ 2.70 g/cm^3 โดยมีระบบผลึกเป็น FCC ขนาดของอะตอมวัดที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.863 และเลขอะตอมเท่ากับ 13

มันัส สติรจินดา กล่าวว่า อลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญและใช้งานกันมากที่สุดในพวกโลหะเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการเป็นสนิม มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานแทนเหล็กและทองแดงได้ อลูมิเนียมมีสมบัติทางด้านการหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมได้ง่าย อย่างไรก็ตามอลูมิเนียมมีขอบเขตการยืดหยุ่นต่ำ (Elastic Limit) ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก [15]

นอกจากนี้ Saunders กล่าวว่า อลูมิเนียมมีสมบัติคล้ายกับโลหะทั่วไป แต่จะมีสมบัติบางอย่าง ซึ่งมีผลกระทบต่อความสามารถในการเชื่อมอลูมิเนียมผสม สิ่งเหล่านี้ควรระวังไว้ ถ้านำเอา อลูมิเนียมมาทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมที่ทันสมัยก็จะได้ประโยชน์สูงสุด สมบัติของ อลูมิเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็นสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และทางกล [16]

2.7.1 สมบัติทางเคมี อลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีความไวสูงมาก ซึ่งอธิบายสามารถได้ว่าไม่พบอลูมิเนียมอยู่ในสถานะอิสระในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไป ถึงแม้จะพบว่าอลูมิเนียมรวมอยู่กับโลหะอื่นในผิวโลก (Earth's Crust) อลูมิเนียมนั้นมีการประกอบกันทางเคมีที่แข็งแรง สำหรับออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาไวมากกับอลูมิเนียมทำให้เกิดออกไซด์ได้เร็ว เมื่ออลูมิเนียมสัมผัสกับอากาศ ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์บางๆ ที่มีความแข็ง และหนาแน่นที่ผิวของอลูมิเนียม ถ้าฟิล์มออกไซด์เกิดการแตกหักหรือเสียหายก็จะสร้างฟิล์มใหม่ขึ้นมาแทนที่อย่างรวดเร็ว ชั้นออกไซด์ที่ปกคลุมอยู่เหนืออลูมิเนียมพอเพียงกับการป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวหน้าและอลูมิเนียมนั้นยังถูกนำมาใช้งานที่หลากหลาย ยังมีวิธีการที่จะทำให้อลูมิเนียมทนทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น ก็จะมีกระบวนการทำที่เรียกว่า การทำ Anodizing คือกระบวนการสร้างฟิล์มบางๆ เคลือบผิวของโลหะด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อป้องกันการกัดกร่อนสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์มีความสำคัญดังนี้

ก. ออกไซด์มีความแข็งมากเป็นวัสดุที่มีความแข็งรองจากเพชร ด้วยเหตุผลนี้อลูมิเนียมออกไซด์จึงถูกนำมาใช้ทำกระดาดทราย ใช้ในการทำล้อหินเจียรใน

ข. อุณหภูมิหลอมเหลวของออกไซด์ 2052°C ซึ่งมากกว่าอลูมิเนียมถึง 3 เท่า การที่จะพยายามทำให้บริเวณการเชื่อมหลอมของอลูมิเนียมนั้นเป็นไปด้วยดี จะต้องทำการกำจัดฟิล์มออกไซด์ออกมาก่อนซึ่งผลที่ตามมา คือ เนื้ออลูมิเนียมจะหลอมก่อนที่ออกไซด์จะหลอมและทั้งสองจะไม่เกิดการรวมกัน

ค. ออกไซด์มีความเสถียรภาพ ฟลักซ์จะต้องถูกกำจัดออกไป เพื่อไม่ให้ไปรวมตัวเป็นสารประกอบคลอไรด์ และ ฟลูออไรด์ ซึ่งจะเป็อันตรายต่อการกัดกร่อนกับโลหะ ด้วยบริเวณรอยต่อไม่สามารถกำจัดออกได้หมด การใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์ค ผลที่ได้จากการใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมจะทำให้สามารถแยกออกไซด์ออกจากฟลักซ์ได้

ง. ออกไซด์เป็นฉนวนทางไฟฟ้า โดยสภาวะปกติแผ่นออกไซด์ไม่พอเพียงที่จะป้องกันในชั้นต้นของเชื่อมอาร์คไฟฟ้า แต่ฟิล์มบางๆ ที่เคลือบที่ผิวก็จะป้องกันการเชื่อมอาร์ค

จ. ผิวของอลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะเป็นรู และก็จะเป็บริเวณที่เก็บกักพวกความชื้นหรือสิ่งสกปรก ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดครุพุนขึ้นในรอยเชื่อม ดังนั้นการปฏิบัติงานเราจะต้องกำจัดออกไซด์ออกไปโดยใช้แปรงลวดขัดที่ผิวโลหะก่อนทำการเชื่อม

2.7.2 สมบัติทางฟิสิกส์ อลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา ซึ่งมันมีน้ำหนักเพียง 1 ใน 3 ของน้ำหนักเหล็ก อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีอุณหภูมิหลอมเหลว 660°C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็กอยู่ครึ่งหนึ่ง แต่ในทางกลับกันการนำความร้อนของอลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าเหล็กถึง

6 เท่า ดังนั้นความร้อนที่จะทำให้เกิดการหลอมต้องมากพอที่จะทำให้มีประสิทธิภาพในการเชื่อมได้ การขยายตัวทางความร้อนก็มากเป็น 2 เท่า ของเหล็กและการหดตัวจากการแข็งตัวเป็น 6 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการขยายตัวสูงจึงทำให้เกิด การบิดตัวได้ง่ายและเกิดรอยรุ่ม ในรอยเชื่อม อลูมิเนียมนำไฟฟ้าได้ดีสูงถึง 65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับทองแดงบริสุทธิ์ อลูมิเนียม ไม่เปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อน และไม่เป็นแม่เหล็ก [17] ดังแสดงตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางฟิสิกส์ [17]

น้ำหนักอะตอม	26.97
ระบบผลึก (Crystal Structure)	FCC ($a = b = c = 4.041 \text{ \AA}$)
ความหนาแน่น (20°C)	2.70 g/cm^3
อุณหภูมิหลอมเหลว	658°C
จุดเดือดกลายเป็นไอ (Boiling point)	1800°C
ความร้อนจำเพาะ ($0-100^{\circ}\text{C}$)	$0.2259 \text{ Cal/g}^{\circ}\text{C}$
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	93 Cal/g
อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว (Solidification Shrinkage)	6.6 %
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20°C)	$23.8 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$
ความต้านทานจำเพาะ (20°C)	2.699 microhm.cm
สภาพตัวนำความร้อน (20°C)	$0.52 \text{ Cal.cm/cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C.sec}$

2.7.3 สมบัติทางกล อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีจุดอ่อนอยู่บ้างแต่ก็มีข้อดี คือ มีความเหนียวสูงแต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการเติมธาตุผสมลงไปหนึ่งธาตุหรือหลายธาตุ ก็จะทำให้ลูมิเนียมผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังคงสามารถรักษาระดับความเหนียวเอาไว้ได้ อลูมิเนียมมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ประมาณ $10 \times 10^6 \text{ psi}$ ซึ่งคิดเป็น 1 ใน 3 ของเหล็ก สมบัติทางกล ประกอบด้วย [12] ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกล [12]

ความแข็งแรง (Tensile Strength)	8-10 kg/mm ²
ความยืดหยุ่น (Elastic limit)	3 kg/mm ²
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40-45 %
ความแข็งแรง (Hardness)	16-20 HB
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	7800 kg/mm ²

2.8 การจำแนกชนิดของอลูมิเนียม

อลูมิเนียม (Aluminum) เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีความสำคัญมาก อาจจะกล่าวได้ว่ามีความสำคัญรองจากเหล็กเท่านั้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าอลูมิเนียมถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล เฟอร์นิเจอร์ อากาศยาน เป็นต้น อลูมิเนียมที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีทั้งอลูมิเนียมบริสุทธิ์และอลูมิเนียมผสม ซึ่งจะเสนอเป็นรายละเอียดดังต่อไปนี้[18]

2.8.1 อลูมิเนียมบริสุทธิ์ เราสามารถทำให้อลูมิเนียมบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 99.9 สมบัติของอลูมิเนียมบริสุทธิ์คือ จะมีความ เหนียวสูงมาก ทั้งนี้ก็เพราะว่าอลูมิเนียมระบบผลึกเป็นแบบ FCC นอกจากนี้อลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) มาแล้วจะทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 1,820 kg/cm² และวัดความแข็งได้ประมาณ 19 BHN

2.8.2 อลูมิเนียมผสม อลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะได้หลายชนิด เช่น ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี ซิลิกอนและแมงกานีส โลหะที่ผสมกับอลูมิเนียมเหล่านี้จะช่วยทำให้อลูมิเนียมมีสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการ เช่น Alloy 4032 เป็นอลูมิเนียมผสมที่ประกอบไปด้วยทองแดงร้อยละ 0.9 แมกนีเซียมร้อยละ 1.1 ซิลิกอนร้อยละ 12.2 และนิกเกิลร้อยละ 0.9 และเมื่อนำอลูมิเนียมชนิดนี้ไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะได้ความแข็งแรงประมาณ 120 BHN และความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 9,100 kg/cm² จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมโลหะชนิดอื่นลงไป ในอลูมิเนียมจะทำให้อลูมิเนียมผสมนั้นมีสมบัติทางกลสูงขึ้นมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองจึงทำให้อลูมิเนียมผสมถูกนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นอลูมิเนียมผสมยังสามารถนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้อลูมิเนียมผสมมีสมบัติทางกลดีขึ้นอีก

ดังนั้น เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับชนิดของอลูมิเนียมดังกล่าว จึงควรสังเกตที่เลขบอกประเภทของอลูมิเนียม ซึ่งสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (Aluminum Association of America) ได้กำหนดเป็นมาตรฐานของอลูมิเนียมไว้ดังนี้คือ ถ้าเป็นเลขกลุ่ม 4 หลักเป็นสัญลักษณ์กำหนดสำหรับอลูมิเนียมขึ้นรูปและกำหนดเป็นเลข 3 และ 2 หลัก เป็นสัญลักษณ์กำหนดสำหรับอลูมิเนียมหล่อ ดังแสดงตามตารางที่ 2.4 ตามลำดับของตัวเลข โดยเรียงลำดับจาก 1 ถึง 9

ตารางที่ 2.4 กลุ่มตัวเลข 4 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอลูมิเนียมขึ้นรูป [18]

เลข 4 หลัก	โลหะผสม
1XXX	อลูมิเนียมบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0
2XXX	ทองแดง
3XXX	แมงกานีส
4XXX	ซิลิกอน
5XXX	แมกนีเซียม
6XXX	แมกนีเซียมและซิลิกอน
7XXX	สังกะสี
8XXX	ธาตุอื่นๆ
9XXX	สำรองไว้ใช้ในอนาคต

จากตารางที่ 2.4 เลขตัวแรกของแต่ละกลุ่มนั้นจะแสดงชนิดของโลหะผสม เช่น เลขที่กลุ่มที่ 2 XXX เลข 2 นั้นหมายถึงทองแดง สำหรับเลขตัวที่ 2 ถ้าเป็นเลข 1-9 นั้น หมายถึง มีการปรับปรุงส่วนผสมของโลหะให้เปลี่ยนไปจากเดิม แต่ถ้าเลข 0 นั้นหมายถึงไม่มีการปรับปรุงส่วนผสม เช่น อลูมิเนียม 5056 อลูมิเนียมผสมชนิดนี้มีส่วนผสมของแมกนีเซียมร้อยละ 5.1 แมงกานีสร้อยละ 0.12 และโครเมียมร้อยละ 0.12 แต่เมื่อมีการปรับปรุงส่วนผสมให้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จะได้อลูมิเนียม 5454 ซึ่งจะมีแมกนีเซียมร้อยละ 2.8 แมงกานีสร้อยละ 0.8 และโครเมียมร้อยละ 0.12 ส่วนเลขตัวที่ 3 และ 4 นั้น หมายถึงมีโลหะผสมอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น การนำโครเมียมผสมกับอลูมิเนียม 5454 เป็นต้น

ส่วน แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา [17] กล่าวว่า อลูมิเนียมอ่อน (Wrought Aluminum) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่สามารถผ่านกรรมวิธีให้ความร้อน (Non-Heat-Treatable) และกลุ่มที่สามารถผ่านกรรมวิธีให้ความร้อน (Heat-Treatable)

อลูมิเนียมอ่อนแบบไม่สามารถผ่านกรรมวิธีให้ความร้อน โลหะผสมประเภทนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการบ่มแข็ง (Precipitation Strengthening) ได้แต่สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการขึ้นรูปงานเย็น (Cold-Working) เท่านั้น ซึ่งมี 3 กลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกันคือ 1XXX, 3XXX และ 5XXX

อลูมิเนียมอ่อนแบบสามารถผ่านกรรมวิธีให้ความร้อน โลหะผสมอลูมิเนียมบางชนิดจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการบ่มแข็ง (Precipitation Strengthening) ได้โลหะผสมในกลุ่มนี้ ได้แก่ 2XXX, 6XXX และ 7XXX

ตารางที่ 2.5 กลุ่มตัวเลข 2 และ 3 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอลูมิเนียมหล่อ [18]

กลุ่มเลข	โลหะผสม
1-99	ซิลิกอน
1XX	ทองแดง
2XX	แมกนีเซียม
3XX	ซิลิกอน
4XX	แมงกานีส
5XX	นิกเกิล
6XX	ดีบุก
7XX	สังกะสี

จากตารางที่ 2.5 สำหรับอลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการหล่อนั้น จะใช้ตัวเลข 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเลข 2 หลักและกลุ่มเลข 3 หลัก ตัวเลขแต่ละตัวจะ มีการใช้คล้ายกันกับกลุ่มเลขของอลูมิเนียมอ่อน เช่น 2XX เลขตัวแรกหมายถึงแมกนีเซียม ส่วนเลขตัวที่ 2 และ 3 เท่านั้น หมายถึงโลหะผสมอื่นๆ เช่น อลูมิเนียม 384 มีซิลิกอนผสมอยู่ร้อยละ 12 ทองแดงร้อยละ 3.8 และผ่านกระบวนการหล่ออัด

2.9 สัญลักษณ์เพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของอลูมิเนียมอ่อน (Wrought Aluminum)

สัญลักษณ์เพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของอลูมิเนียมอ่อน [17] ประกอบด้วย

2.9.1 สัญลักษณ์เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Temper Designations) สำหรับในกรณีของโลหะผสม Wrought Aluminum จะตามหลังตัวเลข 4 ตัว ดังได้กล่าวข้างต้น และ คั่นด้วยขีด (ตัวอย่างเช่น 1100-H) และการแบ่งย่อยของสัญลักษณ์เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนจะแทนด้วยตัวเลข 1 หลัก หรือมากกว่า 1 หลัก โดยตามหลังตัวอักษรสัญลักษณ์เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนอีกทีหนึ่ง (ตัวอย่างเช่น 1100-H14)

ก. F เป็นไปตามที่ผ่านการขึ้นรูป (Fabrication) ไม่มีการควบคุมปริมาณของ Strain Hardening ไม่มีการจำกัดสมบัติเชิงกล

ข. O ถูก Annealed และ Recrystallized เป็นการทำให้ Temper เพื่อให้มีความแข็งแรงน้อย ที่สุดแต่มีความเหนียวมากที่สุด

ค. H ถูก Strain- Hardened

ง. T ถูก Heat-Treated เพื่อผลิตสมบัติที่มีความเสถียรมากกว่าแบบ F หรือ O

2.9.2 การแบ่งย่อยสัญลักษณ์เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Subdivision)

ก. H1 ถูก Strain-Hardened เท่านั้น ระดับการทำ Strain Hardening จะถูกบอกด้วยตัวเลขตัวที่สองและจะมีค่าตั้งแต่ความแข็งประมาณหนึ่งส่วนสี่ (H12) ถึงความแข็งมากที่สุด (H18) ซึ่งมักถูกกระทำโดยการลดพื้นที่หน้าตัดลง 75 เปอร์เซ็นต์

ข. H2 ถูก Strain-Hardened และ Annealed บางส่วน วัสดุที่ผ่านการ Cold Working ซึ่งมีความแข็งแรงมากเกินความต้องการในช่วงแรกสามารถทำให้มีความแข็งแรงประมาณหนึ่งส่วนสี่ถึงความแข็งมากที่สุด โดยการ Annealing ซึ่งมีการเรียกชื่อดังนี้คือ H22, H24, H26, และ H28

ค. H3 ถูก Strain-Hardened และการทำให้อ่อนตัว คือการทำ Age-Softening โลหะผสมอลูมิเนียมแมกนีเซียม ที่ถูกทำ Strain-Hardened โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้นและทำให้สมบัติเชิงกลอ่อนตัว ซึ่งมีการเรียกชื่อดังนี้คือ H32, H34, H36 และ H38

ง. T1 ถูก Naturally Aged ผลึกภัณฑ์จะถูกทำให้เย็นลงจากอุณหภูมิสูงและทำการ Natural Aging จนผลึกภัณฑ์อยู่ในสภาวะที่คงตัว

จ. T3 ถูก Solution Heat-Treated, Cold-Worked และ Naturally Aged จนกระทั่งอยู่ในสภาวะที่คงตัว

ฉ. T4 ถูก Solution Heat-Treated และ Naturally Aged จนกระทั่งอยู่ในสภาวะที่คงตัว

ช. T5 ทำให้เย็นลงจากอุณหภูมิสูง และทำการ Artificial Aging

ซ. T6 ถูก Solution Heat-Treated และ Artificially Aged

ณ. T7 ถูก Solution Heat-Treated และ Stabilized

ด. T8 ถูก Solution Heat-Treated, Cold-Worked และตามด้วย Artificially Aged

2.10 การเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม

กระบวนการเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมสามารถทำการเชื่อมได้หลายกระบวนการ เช่น การเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้า การเชื่อมแก๊สและการเชื่อมแบบแก๊สเฉื่อย (Inert Gas Welding) เป็นต้น ในปัจจุบันนี้เริ่มนิยมใช้ การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) กับอลูมิเนียมผสมกันมากขึ้น

เชิดเชลง ชิตชวนกิจ และคณะ กล่าวว่า ปัญหาอย่างหนึ่งในการเชื่อมอลูมิเนียมผสม ก็คือฟิล์มออกไซด์ (Oxide Film) ซึ่งปกคลุมที่ผิวอลูมิเนียม จะป้องกันน้ำโลหะเหลวจากลวดเชื่อมรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อมซึ่งปัญหาอันนี้จะหมดไปเมื่อใช้วิธีการเชื่อมแบบแก๊สเฉื่อย ทั้งนี้เพราะแก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมการอาร์คจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากบรรยากาศเข้าไปรวมตัวกับโลหะเหลว และการอาร์คจะทำให้ฟิล์มออกไซด์ที่ลอยอยู่บนผิวน้ำโลหะเหลวแยกจากกัน ทำให้น้ำโลหะซึ่งหลอมจากลวดเชื่อมรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อมได้ รอยเชื่อมที่ได้จากวิธีการเชื่อมนี้จะสวยและมีสมบัติดีเมื่อเชื่อมอลูมิเนียมผสมด้วยการเชื่อมแบบอาร์ค

ไฟฟ้า การเชื่อมแก๊สหรือการประสาน (Brazing) สิ่งสำคัญคือ ฟลักซ์ ที่ใช้จะต้องมีส่วนผสมของคลอไรด์หรือฟลูออไรด์ เพื่อไปขจัดฟิล์มออกไซด์ออกไปจากผิวหน้าของบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อม ข้อเสียของการเชื่อมแบบนี้ก็คือ ภายหลังจากทำการเชื่อมจะต้องทำความสะอาดชิ้นงาน อย่าให้ฟลักซ์ที่ใช้เหลือติดกับผิวงาน เพราะฟลักซ์เหล่านี้สามารถกัดกร่อนผิวงานได้ นอกจากนั้น ถ้าหากฟลักซ์ไปรวมอยู่กับโลหะรอยเชื่อมด้วยแล้วจะเกิดจุดเสียขึ้นภายในรอยเชื่อม [19]

2.11 ความสามารถในการเชื่อม

อลูมิเนียม และอลูมิเนียมผสมมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากเหล็กกล้า ข้อแตกต่างนี้จะเห็นได้ชัดเจนในเรื่องความสามารถในการเชื่อม (Weld Ability) จุดอ่อนเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมผสม [19] ดังนี้

2.11.1 เนื่องจากอลูมิเนียมผสมมีความร้อนจำเพาะและความสามารถในการนำความร้อนสูง ดังนั้นการให้ความร้อนเพื่อให้บางส่วนของชิ้นงานหลอมเหลวนั้นทำได้ยาก

2.11.2 วัสดุชนิดนี้เกิดออกไซด์ได้ง่าย และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เกิดขึ้นก็มีจุดหลอมเหลวสูงออกไซด์เหล่านี้จะป้องกันไม่ให้น้ำโลหะที่เติมลงไปมารวมเข้ากับโลหะชิ้นงาน (Lack of Fusion)

2.11.3 เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง ดังนั้นชิ้นงานจะบิดตัวได้ง่าย นอกจากนั้นยังเกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ได้ง่ายด้วย

2.11.4 ความสามารถในการรวมตัวของแก๊สไฮโดรเจนในอลูมิเนียมผสม ในสภาพของเหลวแตกต่างไปจากในสภาพของแข็งมาก ในขณะที่แข็งตัวจะเกิดวันลอยออกมา ดังนั้นถ้าหากอัตราการแข็งตัวสูงๆ เกิดขึ้น ควันที่ลอยออกมาก็จะติดอยู่ภายในเนื้อวัสดุทำให้เกิดเป็นรูอากาศ (Blowholes) ขึ้น

2.11.5 อลูมิเนียมหรืออลูมิเนียมผสมมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ดังนั้นพวกวัสดุแปลกปลอมซึ่งอยู่ภายในของบ่อหลอมจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะได้ยาก นั่นคือวัสดุแปลกปลอมเหล่านั้นจะคงอยู่ในโลหะรอยเชื่อม

2.11.6 เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำและน้ำโลหะที่หลอมมีความหนืด (Viscosity) จึงทำให้บริเวณที่ได้รับความร้อนหลอมตัวและหยุดได้ง่าย

2.12 สมบัติของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1

สมบัติของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 [20] ประกอบด้วย

2.12.1 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 อ้างอิงจากเอกสาร ASM Metals Handbook Volume 2 ดังแสดงในตารางที่ 2.5

2.12.2 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 อ้างอิงจากเอกสาร ASM Metals Handbook Volume 2 ดังแสดงในตารางที่ 2.6

2.12.3 กรรมวิธีทางความร้อนของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 อ้างอิงจากเอกสาร ASM Metals Handbook Volume 2 โดยจะมีขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้

ก. การอบละลาย (Solution Tempering) ที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส

ข. ทำการชุบ (Quenching) ลงในสารชุบ

ค. อบบ่มเทียม (Artificially Aging) ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส นาน 7-12 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 [20]

Temper	Tensile Strength		Yield Strength		Elongation (เปอร์เซ็นต์)	Hardness (HB)
	MPa	ksi	MPa	ksi		
O	90	13	48	7	...	25
T1	152	22	90	13	20	42
T4	172	25	90	13	22	...
T5	186	27	145	21	12	60
T6	241	35	214	31	12	73
T83	255	37	241	35	9	82
T831	207	30	186	27	10	70

ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 [20]

ธาตุผสม	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Ti	Zn	Cr
(wt เปอร์เซ็นต์)	0.4-0.9	≤0.01	≤0.35	0.2-0.6	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10

2.13 การทดสอบแรงดึง

วัสดุแทบทุกชนิดที่ผลิตขึ้นมา เพื่อนำไปใช้งานต่างๆ นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบสมบัติของวัสดุ สมบัติต่างๆ เหล่านี้ เป็นสิ่งสำคัญ สำหรับนำไปแก้ไขข้อบกพร่อง หรือพัฒนาให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น สมบัติเด่นที่มีความสำคัญ ข้อหนึ่งคือ สมบัติเชิงกล ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรง และทนทานต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นการทดสอบแรงดึงของวัสดุ ที่เป็นส่วนหนึ่งของสมบัติเชิงกล จึงได้ถูกจัดทำเป็นมาตรฐานขึ้นมา เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการทดสอบและเพื่อเป็นแหล่งอ้างอิงการทดสอบแรงดึง ของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วเริ่มจาก การนำวัสดุมาเตรียมเป็นชิ้นตัวอย่าง ไม่ว่าจะเป็วัสดุที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปหรือขึ้นรูปแล้วก็ตาม การเตรียมเป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งส่วนใหญ่แล้ว จะเตรียมเป็นลักษณะรูปร่างคล้ายดรัมเบลล์ (Drum Bell) คือปลายทั้งสองด้าน จะมีขนาดโตกว่าบริเวณส่วนกลางของชิ้นตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้การดึงเป็นไปอย่างสมบูรณ์แบบ และขาดบริเวณตรงกลาง

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแรงดึง เรียกว่า เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) เครื่องมือดังกล่าวนี้ จะมีปากสำหรับจับชิ้นตัวอย่างอยู่ 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ยึดติดกับแท่นเครื่อง ส่วนที่ 2 ยึดติดกับตัววัดแรง (Load Cell) และสามารถเคลื่อนที่ได้ ในการทดสอบนั้นจะต้องนำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมใส่ระหว่างปากจับทั้งสองข้าง โดยจับที่ส่วนปลายของชิ้นตัวอย่าง แล้วล็อกให้แน่น หลังจากนั้นจึงดึงให้ปากจับส่วนที่ 2 เคลื่อนที่ห่างออกไป โดยปลายอีกข้างหนึ่งของชิ้นตัวอย่าง ยังอยู่กับที่ ชิ้นตัวอย่างที่กำลังยึดออกจะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นตัวอย่างนี้ มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมา ได้แรงที่วัดออกมา มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) การทดสอบจะต้องดึงชิ้นตัวอย่าง จนขาดออกจากกัน แรงต้านสูงสุดของชิ้นตัวอย่างได้เท่าไร ผลที่ได้จากตัววัดแรงก็จะได้เท่านั้น นั่นก็หมายความว่าชิ้นตัวอย่าง ทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับแรงต้าน ของตัวเองที่ทนได้ก่อนขาดจากกัน

ค่าที่วัดได้ดังกล่าวเป็นเพียง ค่าที่วัสดุทนแรงดึงเท่านั้น ซึ่งไม่ใช่ค่าความแข็งแรงหรือที่เรียกว่า Tensile Strength ดังนั้น การคำนวณค่าความแข็งแรงของวัสดุ ทำได้โดยการนำค่าแรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง ผลที่ได้ออกมาเป็นค่าความแข็งแรง ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร [19]

การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมด้วยการใช้วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้นๆ ด้วยอัตราคงที่ ดังรูปที่ 2.5 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะแตกต่างกันไป สำหรับโลหะ อาจทำเป็นแผ่นหรือทำเป็นแท่ง ข้อมูลของแรงสามารถหาได้จากกราฟของการทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม [17]

ความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) การเพิ่มภาระแก่ชิ้นทดสอบจนเลยจุดคราก ชิ้นงานจะยืดขึ้นเรื่อย ๆ จนขนาดที่ภาระสูงสุด (R_m) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ความเค้นแรงดึงสูงสุด: } \sigma_{Rm} = \frac{\text{แรงที่กระทำที่ระดับ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อน}} \quad (2.1)$$

การยืดตัว (Elongation) และการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Reduction of Area) บอกรวมบัติความอ่อนตัว (Ductility) ของแนวเชื่อมแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{\text{ความยาวชิ้นทดสอบหลังขาด} - \text{ความยาวชิ้นทดสอบก่อนขาด}}{\text{ความยาวชิ้นทดสอบก่อนขาด}} \times 100 \quad (2.2)$$

จากการทดสอบแรงดึงของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ของแนวเชื่อม ที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ อย่างละ 3 ชั้น ดังนั้น แนวเชื่อม ที่ใช้ความเร็วในการเชื่อม 175 มิลลิเมตร/นาที แล้วนำผลทดสอบดังกล่าวมาหาค่าเฉลี่ย โดยนำค่าสูงสุดมาคำนวณ

$$\text{ค่าเฉลี่ยของแรงดึงสูงสุด} = \frac{\text{ผลรวมของแรงดึงสูงสุด}}{\text{ผลรวมของจำนวนชิ้นทดสอบ}} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง [21]

2.14 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความหมาย

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคซึ่งอยู่ในแผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอนที่จำเป็นต้องรู้ [22] คือ

2.14.1 เฟอร์ไรต์ (Ferrite, α) คือ สารละลายในสภาพของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิธรรมดาจนถึงประมาณ 723 องศาเซลเซียส ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กได้มากที่สุด 0.025 เปอร์เซ็นต์ บางครั้งเราเรียกว่าเฟอร์ไรต์ว่าเหล็กแอลฟา (α -Iron) เฟอร์ไรต์เป็นชื่อที่มาจากภาษาละติน เรียกว่า เฟอร์รัม (Ferrum) ซึ่งแปลว่า เหล็ก โครงสร้างที่ประกอบด้วยเหล็กที่ค่อนข้างบริสุทธิ์มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์ มีการวางตัวของอะตอมเป็นแบบ BCC (Body Center Cubic) เป็นสารแม่เหล็ก มีคุณสมบัติต่างๆ ไป คือ อ่อนและเหนียว

2.14.2 ซีเมนไทต์ หรือ ไอออนคาร์ไบด์ (Cementite) เป็นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติแข็ง ทนต่อการเสียดสีได้ดี เป็นตัวช่วยเสริมคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ในกรณีที่เหล็กผ่านการชุบ คาร์ไบด์จะแทรกตัวในพื้นที่ของโครงสร้างพื้นฐาน ในกรณีที่เป็นโลหะผสมจะปนอยู่ในเนื้อเหล็ก เช่น ทั้งสแตนคาร์ไบด์ หรือ โครเมียมคาร์ไบด์ ให้คุณสมบัติทนต่อการเสียดสีได้สูง ซีเมนไทต์ไม่เพียงแต่จะเกิดในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่มากเท่านั้น ในเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำก็อาจเกิดคาร์ไบด์ในพื้นที่ของเฟอร์ไรต์ได้เช่นกัน

2.14.3 เพิร์ลไลต์ (Pearlite) คือ โครงสร้างที่เกิดจากการรวมตัวสลับกันสองเฟส คือ เฟอร์ไรต์ ซีเมนไทต์โดยทั่วไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่มากถึง 0.80 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนจะเป็นโครงสร้างของเพิร์ลไลต์มากที่สุดทั้งก่อน เพิร์ลไลต์ มาจากคำว่า เพิร์ล (Pearl) ซึ่งแปลว่าไข่มุก เนื่องจากว่าเมื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยาย 400 เท่า จะมองเห็นรูปร่างและความวาวคล้ายไข่มุก ลักษณะที่พบมาก คือ เป็นแถบยาวๆ บางๆ เป็นกลุ่มก้อนสีดำ

2.14.4 ออสเทนไนต์ (Austenite, γ) คือ โครงสร้างที่ได้มาจากการนำเหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮโปยูเทคตอยด์มาเข้าในเตาอบที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_1 โครงสร้างภายในก็จะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ ผู้ที่ค้นพบคนแรกคือ โรเบิร์ต มาร์ติน (Robert Martin) จากโครงสร้างออสเทนไนต์นำมาชุบแข็งด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มน้ำหรือน้ำมัน โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ แต่มีส่วนหนึ่งที่ยังคงเป็นออสเทนไนต์อยู่เรียกว่าออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) ปริมาณของออสเทนไนต์ที่ตกค้างจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก อุณหภูมิชุบแข็งและการทำให้เย็น เราสามารถทำให้ออสเทนไนต์ตกค้างนั้นหายไปได้โดยการอบคืนตัวหรือการทำเทมเปอร์ริง (Tempering) โดยอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดในการทำแล้วแต่โลหะแต่ละชนิด

2.14.5 มาร์เทนไซต์ (Marten site) คือ โครงสร้างจุลภาคที่ไม่มีในแผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอน โดยได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเนื้อโลหะอันเนื่องมาจากความร้อน โดยการนำเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ซึ่งมีโครงสร้างภายในเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์มาเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_1 จนถึงเส้น A_3 ซึ่งโครงสร้างภายในจะเป็นออสเทนไนต์ จากนั้นรีบนำออกมาจากเตาแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยการจุ่มในน้ำหรือน้ำมัน โครงสร้างภายในก็จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์

ซึ่งโครงสร้างนี้มีลักษณะเด่น คือ มีความแข็งแรงมาก เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบว่ามีลักษณะคล้ายเส้น

2.14.5 เบนไนท์ (Bainite) หรือ ทรุสไตต์ (Troostite) คือโครงสร้างที่ได้จากออสเทนไนท์แตกตัวภายใต้อัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จนเกิดเป็นนิวเคลียส และขยายตัวเป็นเฟอไรท์ก่อนมีลักษณะคล้ายเข็มยื่นเข้าสู่ใจกลางเกรนออสเทนไนท์ และผลึกอะตอมของคาร์บอนออกไปด้านข้างจนสูงถึงประมาณ 6067% ก็จะเกิดเป็นแผ่นบางๆ ของซีเมนต์ไต์ขึ้น แลจะถ้าเฟอไรท์ขยายตัวมากขึ้น ก็จะเกิดซีเมนต์ไต์ในบริเวณที่ห่างออกไป การเกิดลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบนไนท์ แต่ถ้าเกิดเป็นกลุ่มๆ แทรกตัวอยู่กับโครงสร้างมาร์เทนไซด์ เรียกว่า ทรุสไตต์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาค [23]

2.15 การเตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค

2.15.1 การตัด (Cutting) [23]

การตัด (Cutting) สื่อความได้ถึงการทำชิ้นงานขาดออกจากกันโดยอาศัยกลไกการขัดถูเนื้อวัสดุด้วยอนุภาคเม็ดขัดขนาดเล็กที่หมุนด้วยความเร็วสูง ลักษณะผิวของวัสดุภายหลังการตัดขึ้นอยู่กับชนิดของใบตัดและเครื่องมือ ความเร็วในการตัด อัตราการป้อนใบตัด ตลอดจนปริมาณและชนิดของสารหล่อเย็น (Coolant) โคนความลึกของร่องรอยที่ผิวหน้าวัสดุจะแปรตามชนิดและวิธีการตัด

การด้วยใบมีดอะแบรซิฟ (Abrasive Cutoff Wheel) สาเหตุที่เรียกว่าใบมีดอะแบรซิฟ เนื่องจากใบตัดดังกล่าวทำขึ้นจากการอัดของผสมระหว่างสารยึด (Binder) สารเติม (Filler) และอนุภาคเม็ดขัด (Abrasive Particles) (โดยทั่วไป คือ อะลูมินาหรือซิลิคอนคาร์ไบด์) ในลักษณะรูปล้อ (Cutoff Wheel)

อนุภาคเม็ดขัดทำหน้าที่ขัดถูหรือตัดเนื้อวัสดุ สารยึดและสารเติมทำหน้าที่ยึดเม็ดขัดให้อยู่ติดกัน โดยตัวแปรที่ส่งผลต่ออายุการใช้งาน (อัตราการสึกของใบตัดหรือการหลุดของเม็ดขัด) ของใบตัดประเภทนี้ๆ ได้แก่ ชนิดของสารยึดและปริมาณของสารเติม ใบตัดอะแบรซีฟได้รับความนิยมน้อยกว่าเพราะหลายเนื่องจากการใช้งานสะดวก รวดเร็ว มีความแม่นยำพอสมควร มีราคาไม่สูงมากนักและคุณภาพของผิวตัดค่อนข้างดี โดยทั่วไปใบตัดอะแบรซีฟจะมีอายุการใช้งานไม่ยาวนานนักเนื่องจากในขณะที่ใช้งาน เม็ดขัดจะหลุดออกมาตลอดเวลา ใบตัดประเภทนี้จึงชื่ออีกว่า ใบตัดแบบสิ้นเปลือง (Consumable Wheel)



รูปที่ 2.7 ใบตัดอะแบรซีฟ (Abrasive Cutoff Wheel)

ใบตัดที่มีอนุภาคเม็ดขัดชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์ เหมาะสำหรับตัดโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Materials) ส่วนใบตัดที่มีอนุภาคเม็ดขัดเป็นอะลูมินา (Al_2O_3) เหมาะสำหรับตัดโลหะในกลุ่มเหล็กที่มีความแข็งไม่สูงนัก ใบตัดที่มีอนุภาคเม็ดขัดขนาดใหญ่จะตัดได้อย่างรวดเร็วและเกิดความร้อนเพียงเล็กน้อยส่วนอนุภาคเม็ดขัดที่มีขนาดเล็กสามารถตัดผิวได้เรียบกว่า จึงเหมาะสมสำหรับตัดชิ้นงานที่ต้องการความประณีตสูง เช่น ท่อที่มีผนังบาง (Thin-Wall Tubing) เป็นต้น

ใบตัดที่มีสารยึดชนิดเรซิน (Resin-Bonded Wheel) จะมีอัตราการตัดสูงมาก เนื่องจากมีพันธะการยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรง ทำให้เม็ดขัดสามารถหลุดออกได้ง่าย ใบตัดจึงสึกเร็วและเม็ดขัดซึ่งมีความคมมากกว่าจะขึ้นมาแทนที่อยู่เสมอ ถ้าเป็นสารยึดที่เป็นยางหรือยางผสมเรซินจะสามารถตัดได้ดีในสภาพที่มีการหล่อเย็น ยางจะยึดเม็ดขัดได้แข็งแรงจึงทำให้ใบตัดสึกช้ากว่าใบตัดที่มีเรซินทำหน้าที่สารยึด

ใบตัดแข็ง (Hard Wheel) และ ใบตัดอ่อน (Soft Wheel) จะหมายถึงใบตัดที่มีการสูญเสียเม็ดขัดได้ยากและง่ายตามลำดับ (มิได้หมายถึงความแข็งแรงของเม็ดขัด) ใบตัดอ่อนมีสมบัติสึกได้ง่าย มีเม็ดขัดใหม่ซึ่งมีความคมขึ้นมาแทนที่อยู่เสมอและนิยมใช้มากกว่าใบตัดแข็งซึ่งมีสมบัติในทางตรงข้าม ใบตัดแข็งจะเหมาะสมกับการตัดชิ้นงานที่มีความแข็งแรงไม่สูงนัก ในขณะที่ใบตัดอ่อน

เหมาะสมกับการตัดชิ้นงานที่มีความแข็งสูง ใบตัดที่ได้รับความนิยม คือ ใบตัดที่มีเม็ดขัดซิลิคอนคาร์ไบด์เนื่องจากมีความแข็งในระดับปานกลาง

2.15.2 การขึ้นเรือน (Mounting) [23]

การขึ้นเรือน (Mounting) คือ การฝังชิ้นงานลงในเรซิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบและมีขนาดพอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวก ทั้งยังช่วยรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยม คม และมุมแหลมของชิ้นงานก่อนเสมอ เพื่อป้องกันการร้าวแตกเสียหายของวัสดุที่ใช้สำหรับขัดผิว ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการขึ้นเรือนแก่ ความสะอาดของชิ้นงานก่อนทำการขึ้นเรือน ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการทำความสะอาดได้ 2 วิธี ดังต่อไปนี้

ก. การกำจัดเศษวัสดุแข็ง เม็ดฝุ่นคราบน้ำมัน หรือไข (Grease) ออกจากผิวชิ้นงาน โดยการเป่าล้าง หรือเช็ด ซึ่งเป็นการทำความสะอาดเชิงกายภาพ (Physical Cleaning)

ข. การกำจัดสารปนเปื้อนโดยการแช่ชิ้นงานในตัวทำละลายที่ไม่ให้ชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนซึ่งบรรจุอยู่ภายในเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaning) โดยทั่วไปใช้เวลาทำความสะอาด 2 ถึง 5 นาที ถ้าเป็นวัสดุเนื้ออ่อนมากอาจใช้เวลาประมาณ 30 วินาที หรือน้อยกว่านั้น จึงถูกจัดเป็นการทำความสะอาดเชิงเคมี (Chemical Cleaning)



รูปที่ 2.8 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นเรือน

2.15.3 วัสดุสำหรับชิ้นงานขึ้นเรือน (Mounting Materials)

การเลือกใช้วัสดุสำหรับขึ้นเรือน (กรณีของเรซิน) ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของชิ้นงานการเปลี่ยนโครงสร้างของชิ้นงานขณะที่ได้รับความร้อนและความดัน รวมทั้งการหดตัวของเรซิน ซึ่งจะมีผลต่อการคงรูปขอบ (Edge Retention) ของชิ้นงานด้วย นอกจากนี้เรซินที่ดีควรมีความแข็งแรงพอที่จะไม่ให้เกิดการบิดเบี้ยวเนื่องมาจากความร้อนในขณะที่ทำการขัดผิวชิ้นงาน มีความทนทานต่อตัวทำละลาย (Solvent) และสารสกัดชิ้นรอยไม่ควรเกิดรอย (Etchant) และไม่ควรถูกกัดกร่อนหรือเป็นรูอากาศได้ง่าย รวมทั้ง ไม่ทำอันตรายต่อผู้ใช้งาน [23]

เรซินที่ใช้ทั่วไปมี 2 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่ต้องใช้งานภายใต้สภาวะที่มีการให้ความร้อนและความดัน (Hot-Pressing Resin) ซึ่งมักอยู่ในรูปผงวัสดุ และกลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อ (Cast Able Resin) ซึ่งมักอยู่ในรูปส่วนผสมระหว่างของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของแข็ง

เรซินชนิดเทหล่อมีให้เลือกใช้หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่

ก. อะคริลิก (Acrylic) สามารถใช้งานได้ง่ายและค่อนข้างคงรูป แต่การคงรูปของบ่มไม่ดีมาก นักระยะเวลาในการคงรูปประมาณ 30 นาที ถึงแม้ว่าอะคริลิกจะเป็นวัสดุขึ้นเรือนแบบเย็นก็ตามแต่ระหว่างหล่อเรซินชนิดนี้จะเกิดความร้อนขึ้น จึงควรใช้แม่พิมพ์ที่มีสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี

ข. โพลีเอสเตอร์ (Polyester) ขณะใช้งานจะมีการหดตัวเพียงเล็กน้อยและทนทานต่อสารเคมีได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับอะคริลิก แต่ใช้ระยะเวลาในการคงรูปนานกว่า

ค. อีพอกซี (Epoxy) จัดเป็นเรซินที่มีการหดตัวต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเรซินชนิดเทหล่ออื่นๆ มีความสามารถในการยึดเกาะที่ดี และทนทานต่อสารเคมีได้ค่อนข้างสูง ยกเว้นในกรดที่มีความเข้มข้นสูงอีพอกซีไวต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างเรซินกับฮาร์ดเดนเนอร์ ระยะเวลาในการคงรูปจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารผสม นอกจากนี้ควรระมัดระวังการเกิดความร้อนสะสมในขณะที่เรซินคงรูปเพราะอาจส่งผลต่อชิ้นงานที่มีความเปราะบางสามารถเกิดความเสียหายได้

2.15.4 การขัดผิว

การขัดผิวเป็นการกำจัดรอยขีดข่วนหรือร่องรอยที่เกิดจากการตัด จำนวนขั้นตอนของการขัดผิวจะขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดกริตเพื่อกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการ มีทั้งการขัดผิวแบบหยาบ การขัดผิวแบบละเอียด การขัดผิวแบบละเอียดด้วยสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolytic Polishing) ในแต่ละขั้นตอนของการขัดผิวควรล้างชิ้นงานก่อนเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปเสมอเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารเศษวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรล้างโดยใช้เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก ซึ่งจะช่วยกำจัดเศษผงขนาดเล็กที่ฝังอยู่ที่ผิวหรือในรูพรุนให้หลุดออกไป และที่สำคัญงานขัดที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนควรได้รับการทำความสะอาดเอากำจัดเศษปนเปื้อนใดๆ เพื่อป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนอีกหรือมีสิ่งสกปรกติดค้างบนผิวชิ้นงาน การขัดผิวแต่ละแบบแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. การขัดผิวแบบหยาบ (Grinding) การขัดผิวแบบหยาบนิยมใช้กระดาษทรายที่มีเม็ดขัดขนาดใหญ่แล้วตามด้วยเม็ดขัดขนาดเล็กลงตามลำดับ สาเหตุที่เรียกว่ากระดาษทรายมีลักษณะคล้ายเม็ดทรายการเลือกใช้เบอร์กระดาษทรายเริ่มต้น(หรือขนาดเม็ดกริต) จะขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวชิ้นงานหลังการตัด ถ้าตัดชิ้นงานด้วยเลื่อยวงเดือน(Band Saw) ควรเริ่มขัดที่ขนาดเม็ดกริต 60 ถึง 120 ถ้าตัดด้วยใบตัดแอบเรชีฟอาจเริ่มขัดด้วยกระดาษทรายที่มีขนาดเม็ดกริต 240 เป็นต้น การขัดผิวแบบเปียก (Wet Grinding) จะใช้น้ำเป็นทั้งสารหล่อเย็นและสารหล่อลื่น น้ำจะช่วยลดความร้อนที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่ขัดช่วยรักษาอายุการใช้งานของกระดาษทราย และช่วยล้างเศษวัสดุไม่ให้ฝังตัว

หรือขูดผิวห้ำชิ้นงาน ยกเว้นในวัสดุบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับน้ำก็ควรเลือกใช้ใช้น้ำมันก๊าดหรือของเหลวอื่นๆ ทดแทน

ทิศทางการขัดควรให้รอยขัดใหม่ทำมุม 45 ถึง 90 องศา ของรอยขัดเดิม ซึ่งเวลาในการขัดของแต่ละชั้นตอนควรนานประมาณ 1 ถึง 2 นาที เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างที่ผิว แรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานก็ควรควบคุมให้สม่ำเสมอ เพราะหากใช้แรงกดน้อยเกินไป ผิวชิ้นงานจะไม่ได้รับการขัดถูแต่จะเกิดความร้อนจากการเสียดสีขึ้นมาแทน แต่หากใช้แรงกดมากเกินไป ก็อาจจะทำให้เศษวัสดุฝังตัวหรือขูดขีดผิวชิ้นงานได้ การใช้มือจับชิ้นงานขณะขัดผิวอาจไม่สามารถควบคุมแรงกดได้อย่างสม่ำเสมอซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวชิ้นงานไม่ได้ระนาบ โดยเฉพาะชิ้นงานที่ขึ้นเรือนมาหนามาก องค์ประกอบสำคัญของการขัดผิวหยาบ ได้แก่ เม็ดขัด (Grinding Media) ซึ่งมีให้เลือกหลายชนิด เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์เอมเมอริ (Emery) อะลูมินา เพชร โบรอนคาร์ไบด์ เป็นต้น เม็ดขัดเหล่านี้ถูกยึดติดอยู่บนกระดาษทรายหรือผ้าขัดซึ่งอยู่ในรูปของแผ่น สายพานหรือจานขัด ขนาดและชนิดของเม็ดขัดจะบ่งบอกถึงลักษณะและร่องลึกที่ผิวของรอยขัด

ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) จัดเป็นเม็ดขัดที่ได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจากมีความแข็ง (9.5Mohs) ขัดเนื้อวัสดุได้ดี และมีราคาที่เหมาะสม ส่วนอะลูมินาเป็นเม็ดขัดที่มีความแข็งใกล้เคียงกับซิลิคอนคาร์ไบด์ แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะมักเกิดปัญหาเนื่องมาจากเม็ดขัดฝังตัวในเนื้อวัสดุ จึงเหมาะกับการขัดงานวัสดุอ่อนเพราะสามารถสังเกตเห็นการฝังตัวได้ง่ายกว่าซิลิคอนคาร์ไบด์

ข. การขัดผิวแบบกึ่งละเอียด (Lapping) เป็นเทคนิคการเตรียมผิวโดยใช้จานขัดที่มีเม็ดขัดกระจายอยู่ผิวหน้าโดยปกติผิวหน้าของจานขัด (Lap Surface) มีลักษณะเป็นร่องวนเหมือนกัน หอย (spiral pattern) ไปตามทิศทางของการหมุนการขัดแบบกึ่งละเอียดจะช่วยปรับระนาบผิวหน้าของชิ้นงานและให้รอยขัดที่ละเอียดกว่าเมื่อใช้งานเม็ดกริตขนาดเดียวกันแต่ขัดด้วยวิธีอื่น ผิวที่ได้จากการขัดจะไม่เป็นมันวาว จึงเหมาะสำหรับการทำผิวเรียบ (Flat Surface) และการเตรียมผิวที่ต้องการคงโครงสร้างของอินคลูชันหรือเกรไฟต์เอาไว้

ค. การขัดผิวแบบละเอียด (Polishing) จุดมุ่งหมายของการขัดผิวแบบละเอียด เพื่อทำการกำจัดร่องรอยจากการขัดแบบหยาบขั้นสุดท้ายให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุด ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีลักษณะเรียบเป็นมันวาว ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวที่ผ่านการขัดผิวแบบละเอียด ได้แก่

2.15.5 ผ้าขัดผิว (Polishing Cloths)

ผ้าขัดมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความยาวและความยืดหยุ่นของเส้นใย (Fiber) ผ้าขัดที่มีเส้นใยสั้น มีขนน้อยหรือไม่มีขน มีความยืดหยุ่น (Lower Nap and Stiffer Fiber) เช่น ผ้าแคนวาส (Canvas) ไนลอน ไหม เท็กซ์เมท (Texmet) (เท็กซ์เมทมีเนื้อผ้าผสมระหว่างผ้าสังเคราะห์ หรือ Chemo textile synthetic กับผ้าแพรเทียม หรือ Rayon) เป็นต้น ผ้าขัดชนิดนี้สามารถจับเม็ดขัดได้ดีทำให้เม็ดขัดมีโอกาสสัมผัสกับผิวหน้าของชิ้นงานมากจึงมีอัตราการขัดสูงและลดโอกาสเกิดจุดบกพร่องประเภทผิวบุ๋ม (Relief) จึงเหมาะสมกับการขัดผิวแบบละเอียดเริ่มแรกเพราะเป็นวิธีการกำจัดร่องรอยจากการขัด

หยาบลำดับสุดท้ายได้อย่างมีประสิทธิภาพส่วนผ้าขัดที่มีเส้นใยยาวและอ่อนนุ่มจะช่วยเพิ่มความนุ่มนวลของการขัดผิว ส่วนผ้าขนยาวปานกลางจะช่วยป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนและไม่ทำให้ผิวหนูนมากเกินไป ดังนั้นผ้าที่ขัดต้องมีความสามารถในการจับเม็ดขัดได้ดีและไม่ควรมีอนุภาคอื่นปะปนอยู่

2.15.6 เม็ดขัด (Polishing Abrasives)

การขัดผิวแบบละเอียดในช่วงเริ่มแรกมักจะใช้ขนาดเม็ดขัดในช่วง 30 ถึง 3 ไมครอน (โดยทั่วไปใช้เม็ดขัด 6 ไมครอน ที่ความเร็วรอบ 150 ถึง 600 รอบต่อนาที) โดยใช้กระดาษทรายหรือผ้าขัดชนิดไม่มีขน ในขณะที่การขัดผิวที่มีความละเอียดยิ่งขึ้นจะใช้เม็ดขัด 1 ถึง 0.05 ไมครอน และใช้กับผ้าขัดชนิดที่มีขนยาวหรือขนสั้นถึงปานกลาง เม็ดขัดที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นอนุภาคเพชร (Diamond Particles) ที่มีอยู่ในรูปของแป้งเปียก (Paste) โดยอาจใส่ลงในหลอดฉีดยาและป้ายลงบนผ้าขัด หรืออยู่ในรูปของเหลวผสม (Liquid Extender) แบบละลายในน้ำหรือละลายในน้ำมัน ซึ่งใช้หยดหรือพ่นลงบนผ้าขัด จึงทำให้ผ้าขัดเปียกชื้นไปด้วยของเหลวผสมเม็ดขัดปริมาณของเหลวผสมควรปรับให้เหมาะสมเพราะถ้าผ้าแห้งเกินไปอัตราการขัดผิวจะลดลงและทำให้เกิดลักษณะผิวฉีกขาด (Surface Tearing) และเกิดจุดบกพร่องประเภทผิวหลุด (Pull Out) แต่ถ้าใช้ปริมาณของเหลวมากเกินไปจนกระทั่งผ้าเปียกชุ่มและอมน้ำจึงทำให้เม็ดขัดแทบไม่มีโอกาสสัมผัสผิวชิ้นงานเลย ในบางครั้งอาจใช้เทคนิคการขัดผิวแบบละเอียดสลับกับการกัดชิ้นรอยกลับไปมาหลายครั้งเพื่อลดค่าหน้าที่ผิวจากการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) และผิวหนูน ถ้าชิ้นงานตัวอย่างมีโครงสร้างแบบสองเฟสที่มีความแข็งของแต่ละเฟสแตกต่างกัน การขัดผิวแบบละเอียดจะช่วยเพิ่มความสามารถในการมองเห็นเฟสที่มีความแข็งมากกว่าได้ เพราะบริเวณเฟสแข็งกับเฟสอ่อนจะมีความนูนแตกต่างกันอย่างชัดเจน

2.15.7 เม็ดขัดเพชรชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Diamond)

จะให้ประสิทธิภาพการขัดที่ดีกว่าเพชรสังเคราะห์และเพชรผลึกเดี่ยว (Synthetic and Monocrystalline Diamond) เนื่องจาก

- ก. มีอัตราการตัดสูงกว่า (Higher Cutting Rates)
- ข. ให้คุณภาพผิวสม่ำเสมอ (Uniform Surface Finish)
- ค. อัตราการขัดผิวมีค่าสูง เนื่องจากผ้าขัดสามารถรักษาระดับความคมได้สม่ำเสมอ
- ง. อนุภาคมีทั้งความแข็งและความเหนียว
- จ. มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) ที่มีความแข็งเท่ากับทุกหน้า
- ฉ. ผิวมีลักษณะหยาบจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการขัดเนื้อวัสดุมากกว่า
- ช. มีพื้นที่ผิวมากกว่าเพชรผลึกเดี่ยวถึง 300%

2.15.8 การทำความสะอาดชิ้นงานและการทำให้แห้ง

การทำความสะอาดและการทำให้แห้งอาจดูเป็นขั้นตอนที่ธรรมดาจนไม่น่าจะกล่าวถึง แต่ในความเป็นจริงการทำความสะอาดผิวและการทำให้แห้งเป็นขั้นตอนที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของโครงสร้างจุลภาค ที่แท้จริงของชิ้นงาน เพราะการทำความสะอาดจะช่วยกำจัดเศษวัสดุที่หลงเหลือจาก

การขัดผิว ถ้าผิวหน้าชิ้นงานมีคราบ รอยเปื้อน หรือสิ่งสกปรกใดๆ ก็ตาม สิ่งเหล่านี้จะบดบังโครงสร้างขณะทำงานตรวจสอบชิ้นงานได้ การทำความสะอาดสามารถแบ่งออกได้สองประเภทดังต่อไปนี้

ก. การทำความสะอาดระหว่างขั้นตอนหลัก (Intermediate Cleaning) การทำความสะอาดแบบนี้จะได้ผลดีที่สุดหากล้างชิ้นงานภายใต้ น้ำไหล (Rinse) ตามด้วยการทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกและจะได้ผลลัพธ์ยิ่งขึ้นหากทั้งชิ้นงานและภาชนะถูกทำความสะอาดด้วยน้ำและเช็ดผ้าด้วยผ้าฝ้าย เพื่อกำจัดเศษส่วนเกินต่างๆ การทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกกับน้ำยาทำความสะอาด (Surfactant) จะช่วยกำจัดเศษที่ติดอยู่ตามร่องหรือรอยแตกของชิ้นงานได้ จากนั้นจึงล้างน้ำยาทำความสะอาดภายใต้ น้ำไหล และทำให้แห้งด้วยลมหรืออากาศแห้ง

ข. การทำความสะอาดขั้นสุดท้าย (Final Cleaning) การทำความสะอาดขั้นสุดท้ายเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด ควรทำทันทีภายหลังการขัดผิวแบบละเอียดลำดับสุดท้ายเพื่อป้องกันการเกิดผลึกหรือการเกาะกันของเม็ดขัด (Crystalline or Agglomerate) บนผิวหน้าชิ้นงาน โดยเฉพาะเม็ดขัดที่มีความละเอียดมากๆ การใช้ผ้าฝ้ายจุ่มแอลกอฮอล์แล้วถูผิวหน้าชิ้นงานเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมมากสำหรับชิ้นงานที่ทำความสะอาดได้ยาก ขั้นตอนการทำความสะอาดขั้นนี้จึงมีความสำคัญเพราะผิวหน้าชิ้นงานต้องนำไปผ่านการกัดชิ้นรอย (Etching) ในขั้นตอนถัดไป

การทำให้แห้ง การใช้แอลกอฮอล์ฉีดพ่นบนผ้าขัดและผิวหน้าชิ้นงานจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำให้แห้ง โดยอาจใช้ควบคู่ไปกับการพ่นลมหรือนำชิ้นงานไปอบแห้ง ฯลฯ

2.15.9 การกัดชิ้นรอย (Etching)

การกัดชิ้นรอยเป็นกระบวนการทำให้เนื้อวัสดุเกิดการกัดกร่อนโดยใช้สารเคมีต่างๆ ซึ่งกลไกเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการกระทำเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrolytic activity) ที่บริเวณหน้าของวัสดุ สารกัดชิ้นรอย หรือ Etchant จะทำให้เกิดความแตกต่างของสีและแสงเงา เนื่องจากแต่ละเฟสมีความเฉพาะตัวในเหลี่ยมผลึก (Crystal faceting) และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกจึงทำให้เกรนหรือ เฟสต่างๆ ถูกกัดกร่อนด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เกิดแนวกัดเป็นชั้นๆ ที่ขอบเกรนทำให้มีการสะท้อนแสงแตกต่างกัน หรืออาจเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ขอบเกรนหรือขอบเฟสเป็นแนวร่องลึก (Grooves) วิธีการที่จะละลายเฟสทั้งเฟสเป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้ปฏิกิริยาทางเคมี ที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นการกัดผิวชิ้นรอยจึงเป็นเพียงหลักการทำให้เฟสที่เราสนใจมีผิวหยาบหรือขรุขระมากขึ้นและสะท้อนแสงได้น้อยลง หรือเป็นการทำให้เฟสนั้นเกิดคราบเปื้อน (Preferential stain) เพื่อทำให้เกิดการสะท้อนแสงที่ไม่เท่ากันจนสามารถเห็นเฟสนั้นเด่นชัดขึ้น สารกัดชิ้นรอยส่วนใหญ่มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนใหญ่ ได้แก่

ก. สารกัดกร่อน (Corrosive Agent) ซึ่งส่วนมากใช้สารประเภทกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก กรดอะซิติก เป็นต้น

ข. สารปรับแต่ง (Modifier) เช่น แอลกอฮอล์ กลีเซอริน เป็นต้น ทำหน้าที่ลดปรากฏการณ์ไอออไนซ์ (Ionization)

ค. สารออกซิไดซ์ (Oxidizer) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อีออนของเหล็ก เป็นต้น ส่วนการกัดขึ้นรอยด้วยวิธีทางไฟฟ้าจะใช้กระแสไฟฟ้าทำหน้าที่ออกซิไดซ์

2.15.10 เทคนิคการกัดขึ้นรอยมีหลายวิธี ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่

การกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมี (Chemical Etching) การกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมีจัดเป็นวิธีการที่มีความสะดวกมากที่สุด โดยทั่วไปมักจะเลือกใช้สารกัดขึ้นรอยสามัญที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายน้อยที่สุดก่อน วิธีการกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมีจะนำชิ้นงานจุ่มในสารกัดขึ้นรอยและแกว่งชิ้นงานเบาๆ หรืออาจเช็ดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารกัดดังกล่าวที่อุณหภูมิห้อง การแกว่งชิ้นงานจะช่วยป้องกันสารมลทินที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีกับเนื้อวัสดุมายึดเกาะที่ผิวหน้าชิ้นงาน และช่วยลดสภาพการขุ่นมัวของผิวชิ้นงานได้ หรืออาจนำแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) หมุนเพื่อกวาดสารเคมีขณะทำการกัดขึ้นรอยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันสารมลทินปกคลุมผิวชิ้นงาน สำหรับวิธีการเช็ดผิวหน้าชิ้นงานจะใช้เฉพาะกรณีที่มีข้อเสนอแนะเท่านั้นเพื่อป้องกันปัญหาจากการเกิดรอยขีดข่วน โดยเฉพาะในโลหะที่มีความแข็งแรงไม่สูงนัก อาจใช้แท่งไม้ที่ติดด้วยปลายผ้าฝ้ายหรือแท่งกระดาษ (paper rod) จุ่มสารจนชุ่มแล้วเช็ดผิวหน้าชิ้นงาน โดยผ้าต้องเปียกชุ่มด้วยสารกัดขึ้นรอยเสมอทุกครั้งที่เช็ด

ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกัดขึ้นรอยจะพิจารณาจากสภาพผิวหน้าของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ความมันเงาหรือสีของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง หากภายหลังการกัดขึ้นรอยแล้วยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ควรแช่ชิ้นงานในน้ำร้อนประมาณ 2 ถึง 3 วินาที และทำให้แห้งแล้วทำการกัดขึ้นรอยซ้ำอีกครั้ง หรืออาจขัดผิวแบบละเอียดและกัดขึ้นรอยซ้ำโดยใช้ระยะเวลาสั้นยิ่งขึ้น ระยะเวลาของการกัดขึ้นรอยเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่จะทำให้ได้ลักษณะทางโครงสร้าง ในขณะที่ชิ้นงานมีสภาพการกัดเกิน (Over etching) จะปรากฏสภาพโครงสร้างที่มีลักษณะมัวและไม่ชัดเจนขึ้น

รอยเปื้อนที่เกิดขึ้นหลังการกัดขึ้นรอยอาจบดบังโครงสร้างที่แท้จริงของวัสดุได้ Griffins ได้แนะนำเทคนิคในการทำสะอาดผิวหน้าขึ้นตัวอย่างหลังการกัดขึ้นรอยโดยใช้ Ethylene Diaminetetraacetic Acid (EDTA) หรือวิธีการล้างด้วยกรด

โดยสรุปแล้ว การกัดขึ้นรอยเพื่อแสดงโครงสร้างที่แท้จริงของชิ้นงานต้องอาศัยการเตรียมผิวอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปการเลือกสาร และวิธีสำหรับการกัดขึ้นรอยที่เหมาะสมจะเลือกใช้สารเคมีที่เป็นพื้นฐานมากที่สุด และนิยมเลือกใช้วิธีการกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมีเนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกที่สุด สารกัดพิเศษและเทคนิคอื่นๆ ของการกัดขึ้นรอยจะเป็นทางเลือกถัดไปเมื่อเทคนิคที่ง่ายที่สุดไม่ก่อให้เกิดผลที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีทุกชนิด จำเป็นต้องศึกษาข้อควรระวังให้มากพอและต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสำคัญ

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากตำรา วารสาร บทความ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

Lin, et al อ้างถึงใน อนันต์ พรหมสิทธิบุตร [8] ได้ทำการทดลองการเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุน (Rotational Friction Welding) ในวัสดุประกอบระหว่างอลูมิเนียม 360 กับผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) โดยศึกษาถึงการออกแบบลักษณะชิ้นงานก่อนที่จะทำการเชื่อม รวมไปถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) หลังการเชื่อม พบว่า ความแข็งของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับารออกแบบลักษณะของชิ้นงานด้วยและพบว่า ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณ Heat Affected Zone สามารถแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณพลาสติกทั้งหมด (Fully Plasticized Region, ZPL) บริเวณพลาสติกบางส่วน (Partly Deformed Region, ZPD) และบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Unreformed Region, ZUD) ซึ่งแต่ละบริเวณมีโครงสร้างและความแข็งที่แตกต่างกัน

อนันต์ พรหมสิทธิบุตร [8] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเทคนิคการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน สำหรับการเชื่อมต่อโลหะประเภทเหล็กอะลูมิเนียม ซึ่งเครื่องเชื่อมแบบแรงเสียดทานในการวิจัยนี้ได้จากการดัดแปลงแท่นส่วนไฟฟ้าที่มีความเร็วในการหมุนประมาณ 3000-3800 รอบต่อนาที โดยใช้แรงกดเสียดทานคงที่ที่ 30 กิโลกรัมและใช้เวลาในการเชื่อมเป็น 60 และ 90 วินาที แล้วเพิ่มแรงกดอยู่เป็น 50 และ 70 กิโลกรัม จากนั้นทดสอบความแข็งแรงและตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม พบว่า ความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงกดอยู่และเวลาในการเชื่อมมีค่ามาก โดยความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 26-75 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเชื่อม อย่างไรก็ตามค่าความแข็งของรอยเชื่อมมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 250 HK (Knoop Hardness) ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม พบว่าเป็น เฟอไรต์และเพิร์ลไลต์ ที่มีขนาดเกรนละเอียด

อนุชา ขวัญสุข [19] ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 โดยการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนด้วยแกนหมุนทรงกระบอกผิวเรียบและผิวเกลียว กระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน (Friction Stir Welding : FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนแบบไม่หลอมละลาย โดยความร้อนที่ได้เกิดจากการเสียดสีกันระหว่าง ผิวแกนหมุนกับเนื้อวัสดุ ทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาพพลาสติก ขณะเดียวกันสลักแกนหมุนจะทำให้ การหมุนกวนทำให้วัสดุเกิดการประสานติดกัน โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมละลาย ของวัสดุ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 177 MPa โดยเปรียบเทียบ อิทธิพลของรูปร่างระหว่างสลักแกนหมุนทรงกระบอกผิวเรียบกับผิวเกลียว พบว่าตัวแปรที่มีผล ต่อคุณภาพงานเชื่อมได้แก่ ความเร็วรอบแกนหมุน ความเร็วเดินเชื่อม และมุมเอียงแกนหมุน ผลการศึกษาพบการเชื่อมด้วยแกนหมุน

ทรงกระบอกผิวเรียบที่ความเร็วรอบแกนหมุน 1000 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินเชื่อม 300 มิลลิเมตร ต่อนาที มุมเอียงแกนหมุน 30 ให้ความสมบูรณ์ และให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 163 MPa ในขณะที่การเชื่อมด้วยแกนหมุนทรงกระบอก ผิวเกลียว ที่ความเร็วรอบแกนหมุน 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที และมุมเอียงแกนหมุน 30 ให้ความสมบูรณ์และความแข็งแรงถึงสูงสุดที่ประมาณ 169 MPa และ ค่าความแข็งที่แนวเชื่อมจะไม่ลดลงต่ำกว่าเนื้อวัสดุเดิมโดยแนวเชื่อมจะมีค่าความแข็งประมาณ 69.4 -76.3 HV 0.2/30

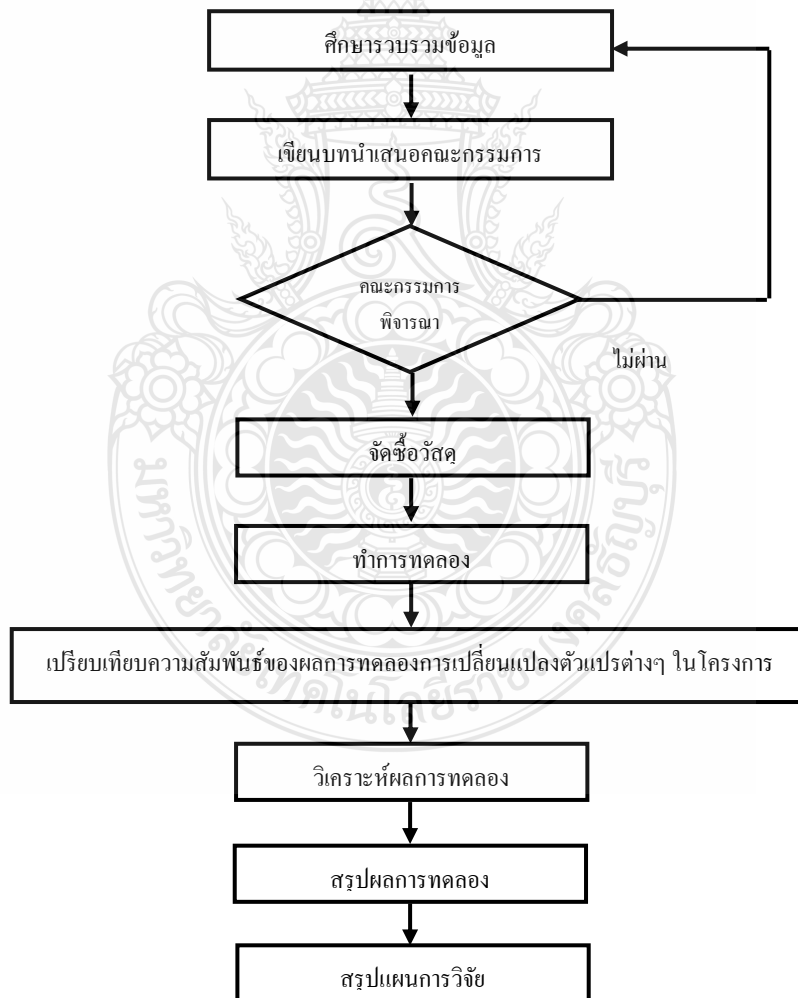


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

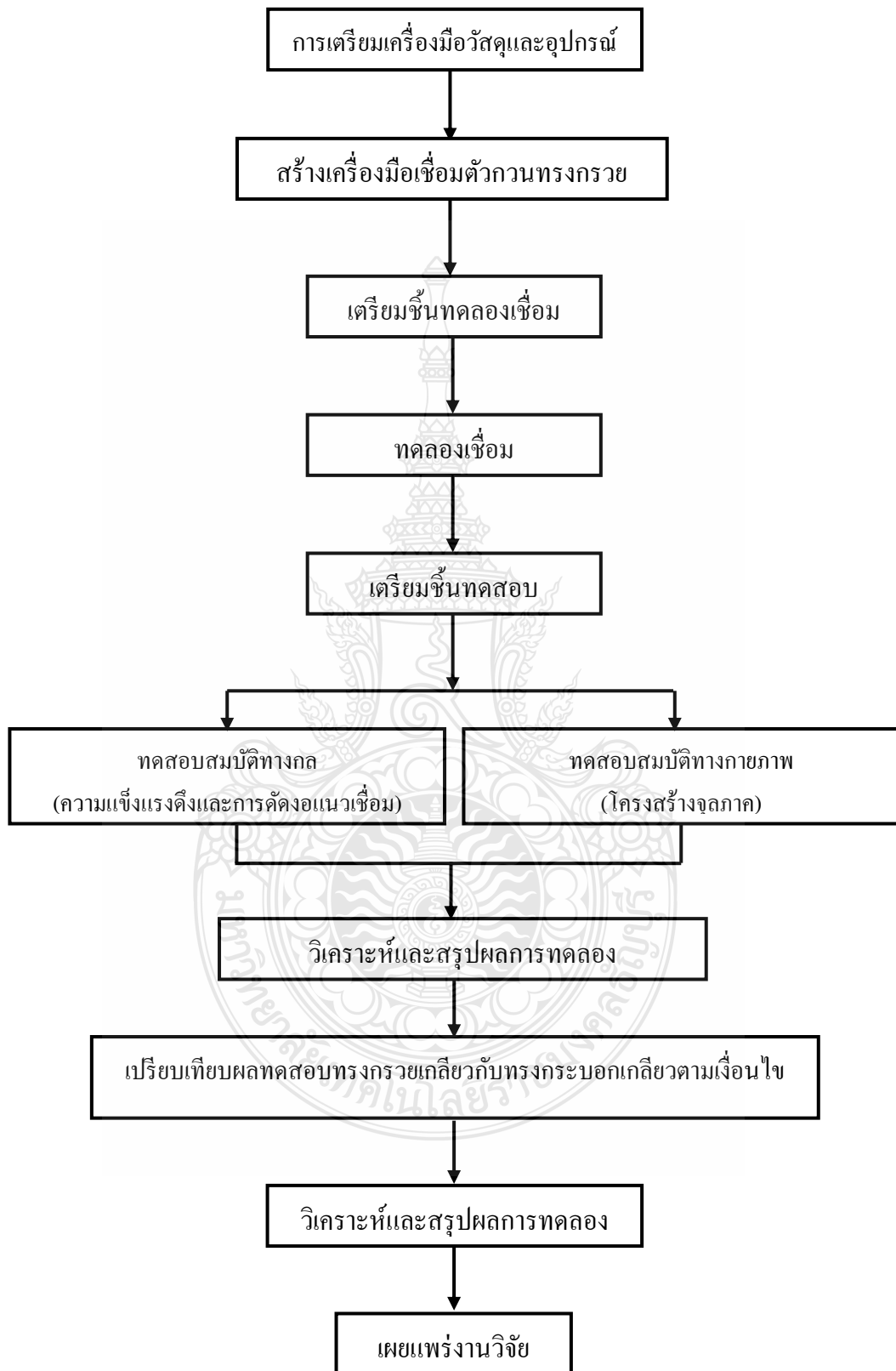
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และการออกแบบรูปร่างตัวถ่วงซึ่งเป็นการพัฒนากรรมวิธีการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ว่ารูปร่างตัวถ่วงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมและ โครงสร้างของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 มากน้อยเพียงใด ด้วยการวิเคราะห์ผล โดยการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม เพื่อทดสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม และเปรียบเทียบ วิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้น จากตัวถ่วงที่มีรูปร่างต่างกัน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 การวางแผนการดำเนินงานในการทำการศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

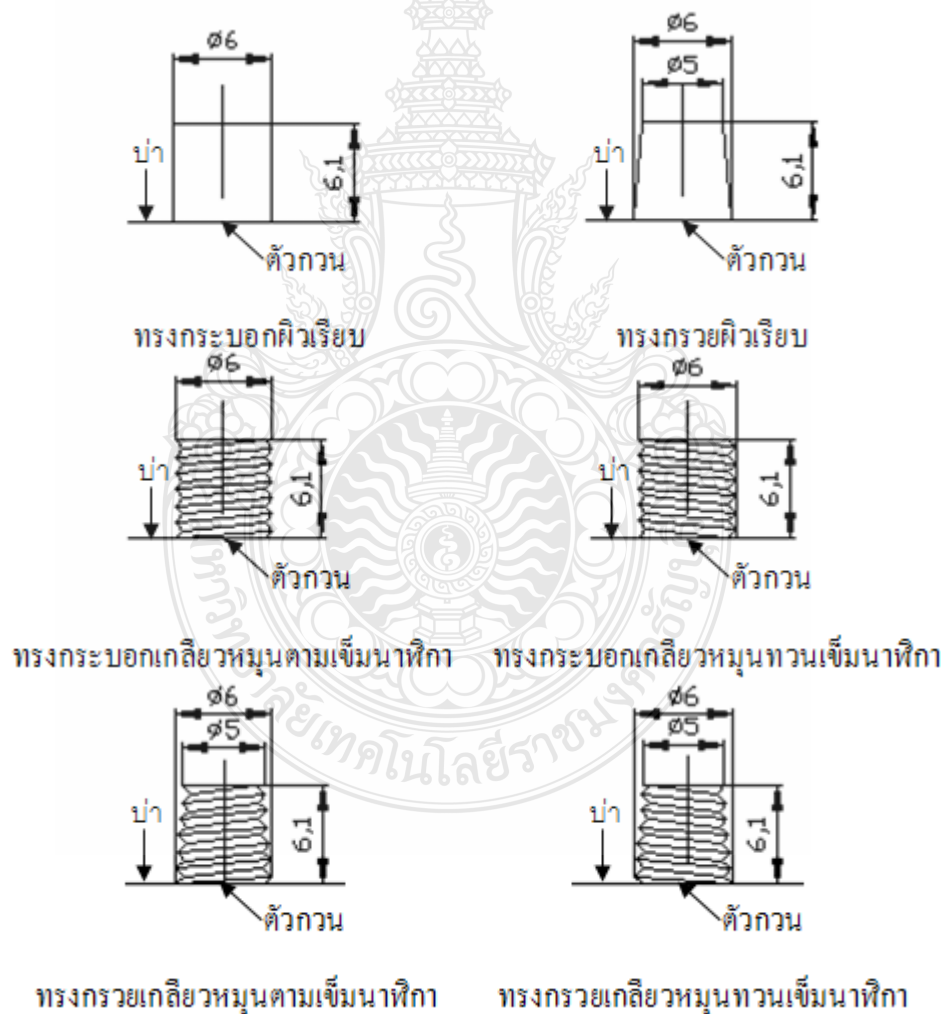


รูปที่ 3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

3.3 เครื่องมือเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาของการทดลองและทดสอบรูปร่างตัวกวนชนิดต่างๆ คือ ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ ตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา และการพัฒนาเครื่องมือเชื่อมที่เชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนของผู้จัดทำวิจัย คือ ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยนำผลการทดสอบที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกัน ในการทดลองได้กำหนดตัวแปรที่สำคัญในการทดลอง คือ

3.3.1 กำหนดลักษณะของเครื่องมือเชื่อม (ตัวกวน) เป็นชนิดรูปร่างแบบต่างๆ โดยตัวกวนแบบมีเกลียวจะเปลี่ยนทิศทางการหมุน 2 ทิศทางคือ หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 3.3

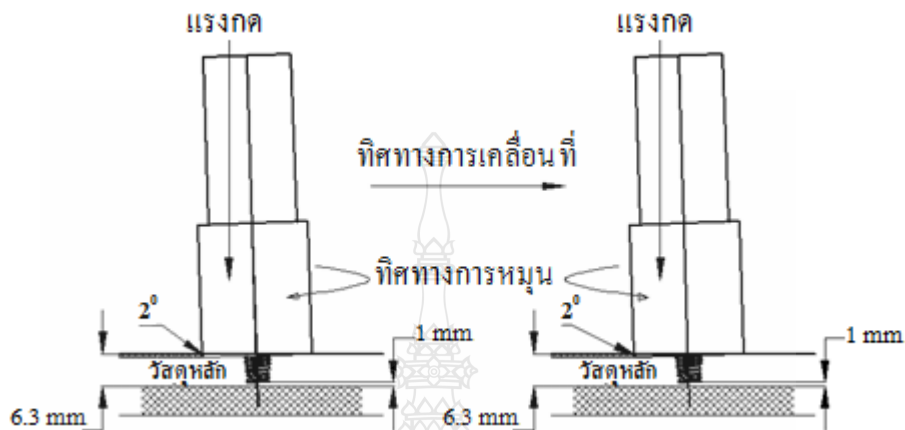


รูปที่ 3.3 ลักษณะของตัวกวนชนิดรูปร่างแบบต่างๆ

3.3.2 ความเร็วรอบของตัวกวน (Tool) คือ 2000 รอบ/นาที

3.3.3 ความเร็วเดินแนวเชื่อม (Traveling Welding Speed) คือ 50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที

3.3.4 มุมเอียงของตัวกวน (Tool) คือ 2 องศา ในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ทิศทางการหมุนและมุมเอียงของตัวกวน

3.4 การสร้างเครื่องมือเชื่อม

การสร้างเครื่องมือเชื่อม (Tool) ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานเย็น เกรด SKD 11 (ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม: Japanese Industrial Standard: JIS) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5 เครื่องมือเชื่อมนี้เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เครื่องมือเชื่อมจะหมุนและทำให้เกิดความร้อนแก่ชิ้นงานขณะเชื่อมโดยมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ

3.4.1 ก้านจับยึด เป็นส่วนที่สวมเข้าไปในอุปกรณ์จับยึด (Adapter) ของเครื่องกัดอัตโนมัติ (NC Milling) เพื่อส่งแรงหมุนไปยังตัวกวน

3.4.2 ป่า (Shoulder) เป็นส่วนที่สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานตรงรอยต่อทำให้เกิดแรงเสียดทานจนเกิดความร้อนที่ชิ้นงานทำให้วัสดุหรือชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหลและเป็นตัวถ่ายเทความร้อนของแนวเชื่อมให้เรียบเสมอกัน

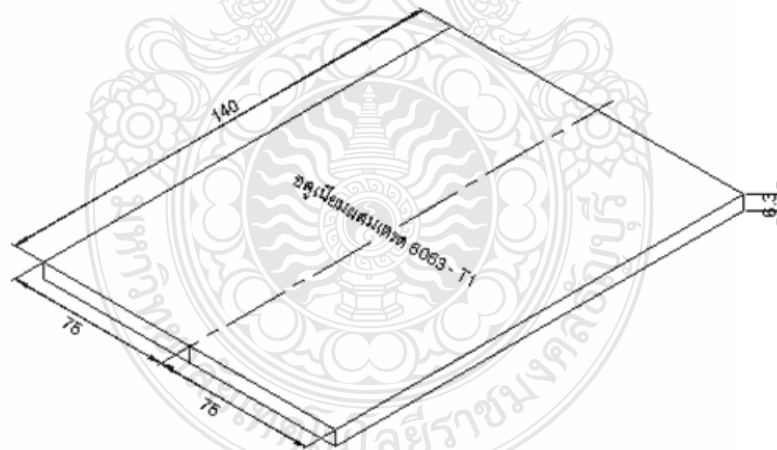
3.4.3 ตัวกวน (Stirrer) เป็นส่วนที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวนหมุนวนอยู่ในเนื้อของวัสดุชิ้นงานทดลอง ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ส่วนต่างๆของเครื่องมือเชื่อม

3.5 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานทดลอง เป็นอลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 (94.7 เปอร์เซ็นต์ Al-0.4 เปอร์เซ็นต์ Mg-0.05 เปอร์เซ็นต์ Mn-0.01 เปอร์เซ็นต์ Cr-0.02 เปอร์เซ็นต์ Cu โดยน้ำหนัก) ที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณ 210 MPa มีขนาดความกว้าง 75 mm, ความยาว 140 mm, และความหนา 6.3 mm. ทำการต่อชน เชื่อมในท่าราบ [24] ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานและการต่อชน

จัดชิ้นงานบริเวณรอยต่อก่อนทำการเชื่อม เพื่อกำจัดอลูมิเนียมออกไซด์ ที่เป็นชั้นฟิล์มบางๆ ที่ติดอยู่บนชั้นผิวของอลูมิเนียมด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงเบอร์ละเอียด แล้วทำความสะอาดด้วยอะซิโตน นำชิ้นงาน 2 ชิ้นวางบนแท่นเครื่องกัดแบบอัตโนมัติ (CNC Milling) โดยใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงาน (JIG) และแผ่นรองชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงานและแผ่นรองชิ้นงาน

การจับยึดชิ้นงาน ในกระบวนการเชื่อมโดยใช้แรงเสียดทานแบบกวน ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเชื่อมเป็นวัสดุประเภทโลหะอ่อนและเบา จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ในขณะที่ทำการเชื่อมด้วยวิธีนี้วัสดุมีเปอร์เซ็นต์การบิดตัวได้สูง จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ช่วยในการจับยึดชิ้นงานที่มีความแข็งแรง แผ่นรองรับชิ้นงานต้องทนอุณหภูมิได้สูง โดยไม่มีการเสียรูปขณะที่ทำการเชื่อมและสามารถใช้งานได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การจับยึดชิ้นงาน

3.6 ขั้นตอนและวิธีการเชื่อมชั้นทดลอง

การเชื่อมชั้นทดลองจะทำการเชื่อมตามทิศทางแนวรีดของวัสดุหลัก ในการทดลองเชื่อมจะใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) แนวตั้ง รุ่น FDX 86 ยี่ห้อ Makino ตามมาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standard) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากเงื่อนไขที่กำหนด เครื่องมือเชื่อม ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา ใช้ความเร็วรอบเครื่องมือเชื่อม คงที่ 2000 รอบ/นาที ตัวกวนทำมุมเอียง 2 องศาในแนวตั้ง ความเร็วในการเชื่อมจะเปลี่ยนแปลง โดยเริ่มต้นที่ค่าความเร็ว 50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ก) เมื่อกระบวนการเชื่อมเสร็จได้ชั้นทดลองและนำไปทำการทดสอบสมบัติทางกลต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ข)



รูปที่ 3.9 เครื่องกัดแบบอัตโนมัติ



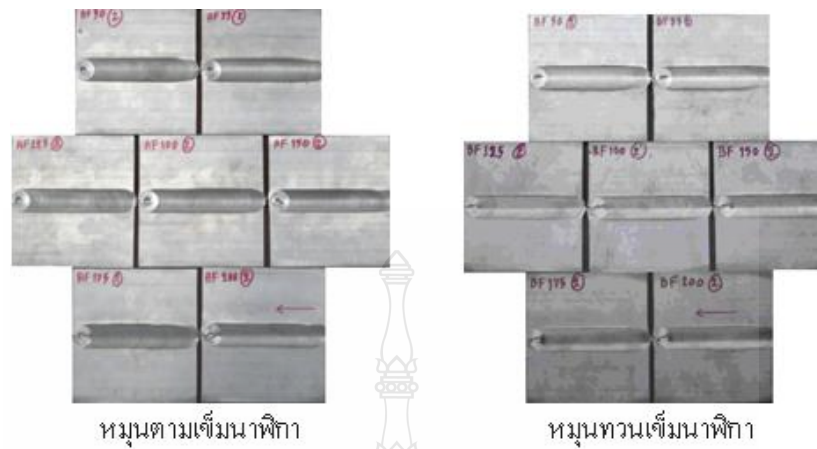
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 การเชื่อมชั้นทดลอง

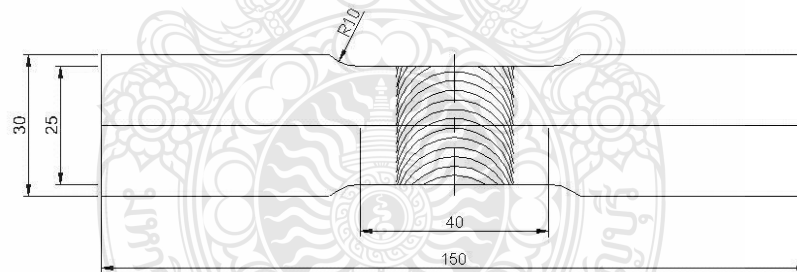
ทำการถอดชิ้นทดลองที่เชื่อมออกจากอุปกรณ์จับยึด ได้ชิ้นทดลองที่เชื่อมเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว

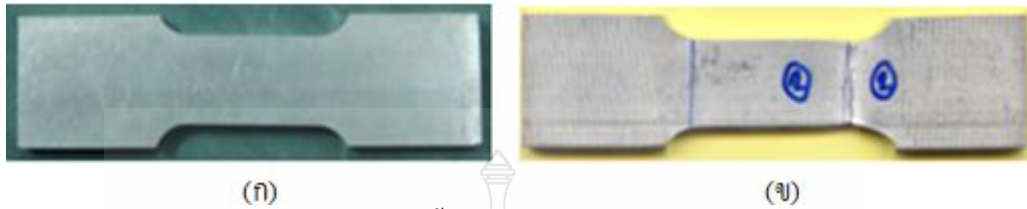
3.7 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

3.7.1 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง ในการทดสอบแรงดึง ขนาดของชิ้นทดสอบจะยึดมาตรฐาน AWS - D 1.2 เป็นมาตรฐานหลักในการเตรียมชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



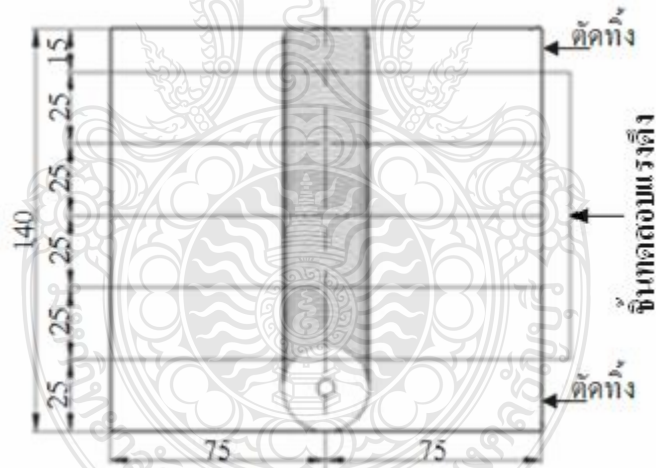
รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบแรงดึง (AWS - D 1.2) [24]

3.7.2 เตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของวัสดุหลัก ก่อนทำการดัดจำนวน 3 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) ด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) เพื่อนำค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงของวัสดุหลักไปหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบ และได้ชิ้นทดสอบวัสดุหลัก หลังดัดดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ข)



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบแรงดึงวัสดุหลัก

3.7.3 ทำการวัดชิ้นทดลองที่เชื่อมเสร็จแล้ว โดยตัดที่จุดเริ่มต้นของแนวเชื่อมและจุดสุดท้ายที่สิ้นสุดแนวเชื่อม (หัว-ท้ายชิ้นทดลองเชื่อม) ออกข้างละประมาณ 15 - 25 เซนติเมตร ซึ่งเป็นจุดที่แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ เมื่อมองด้วยตาเปล่า ส่วนชิ้นต่อไปตัดยาวประมาณชิ้นละ 25 เซนติเมตร จะได้ชิ้นทดสอบ 4 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.14

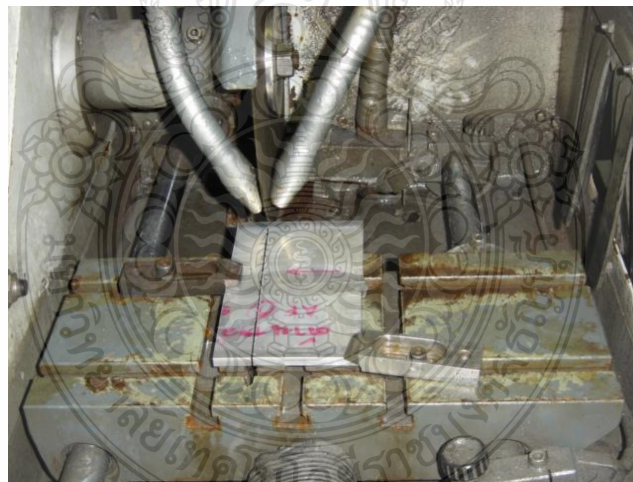


รูปที่ 3.14 ลักษณะการวัดและการตัดชิ้นทดสอบแรงดึง

3.7.4 เตรียมชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา ทุกชิ้นงาน ที่ใช้ความเร็วในการเชื่อมต่างกัน มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดไมโครคัตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยใช้ใบตัดไมโครไฟเบอร์ขนาด 255 x 1.5 x 31.75 มิลลิเมตร ในขณะที่ตัดชิ้นทดสอบควรจับยึดชิ้นงานที่ตัดให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึด ดังแสดงในรูปที่ 3.16

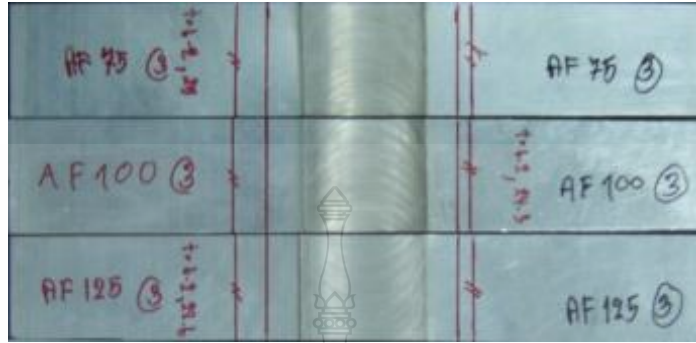


รูปที่ 3.15 เครื่องตัดไมโครคัตเตอร์



รูปที่ 3.16 การตัดชิ้นงานและการจับยึดชิ้นงาน

3.7.5 การตัดชิ้นงานทดสอบจะตัดตามแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม ขณะตัดชิ้นงานต้องทำการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็นตลอดเวลาเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลให้การทดสอบคลาดเคลื่อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



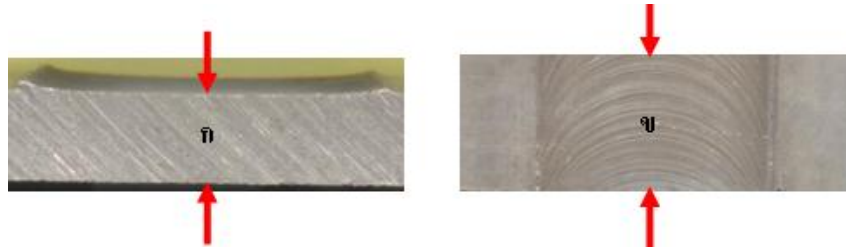
รูปที่ 3.17 การตัดชิ้นงานทดสอบในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม

3.7.6 นำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ดังแสดงในรูปที่ 3.18



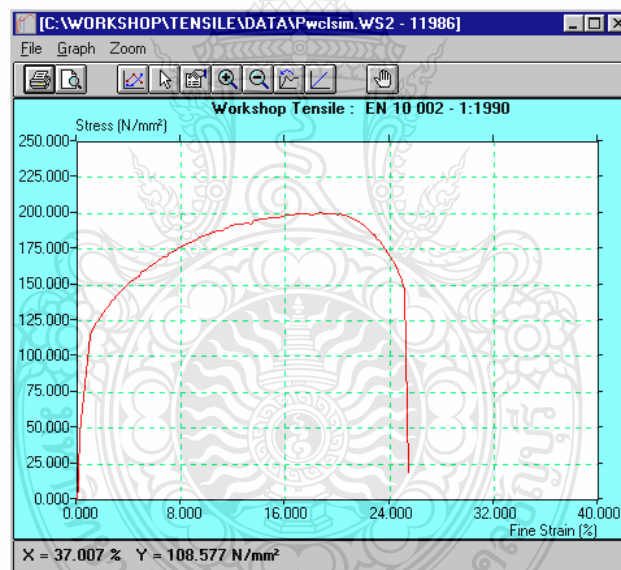
รูปที่ 3.18 การทดสอบแรงดึง

โดยทำการวัดขนาดความหนา และความกว้างตรงแนวเชื่อมของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.19 การวัดขนาดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบ

เพื่อนำข้อมูล ไปป้อนที่ชุดคำสั่งควบคุมเครื่องทดสอบแรงดึง ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงจะประมวลผลค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (R_m) ของชิ้นทดสอบด้วยชุดควบคุม ซึ่งชุดควบคุมจะควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงออกมาเป็นรูปภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง

3.8 การเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นทดลองที่ผ่านการอัดรีดเรียบร้อยแล้ว โดยใช้ชิ้นทดสอบที่มีค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด ในการตรวจหาจุดบกพร่องของแนวเชื่อมใช้กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Meiji Techno รุ่น Pixera Model No. PVC 100c FCC ID.NVGPVC101 ซึ่งขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อศึกษาโครงสร้างให้ดูรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อ 2.15 การเตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากขั้นตอนการดำเนินงาน การศึกษาวิจัย สามารถอธิบายผลการวิเคราะห์ และการทดสอบที่เชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ของตัวกวนรูปร่างแบบต่างๆ ในการเชื่อมต่อชน ทาราบที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อม (อัตราป้อน) ตั้งแต่ 50 จนถึง 200 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งปรับเพิ่มครั้งละ 25 มิลลิเมตร/นาที และบ่าของเครื่องเชื่อม (Shoulder) ทำมุมเอียงในแนวตั้งกับผิวชิ้นงาน 2 องศา โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

4.1 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ

4.1.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา

4.1.2 ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

4.1.3 บริเวณการร้าวหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ

4.1.4 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค

4.1.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ

4.2 ตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ

4.2.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา

4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

4.2.3 บริเวณการร้าวหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ

4.2.4 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค

4.2.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ

4.3 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

4.3.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา

4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

4.3.3 บริเวณการร้าวหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ

4.3.4 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค

4.3.5 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค

4.3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

4.4 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา

4.4.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา

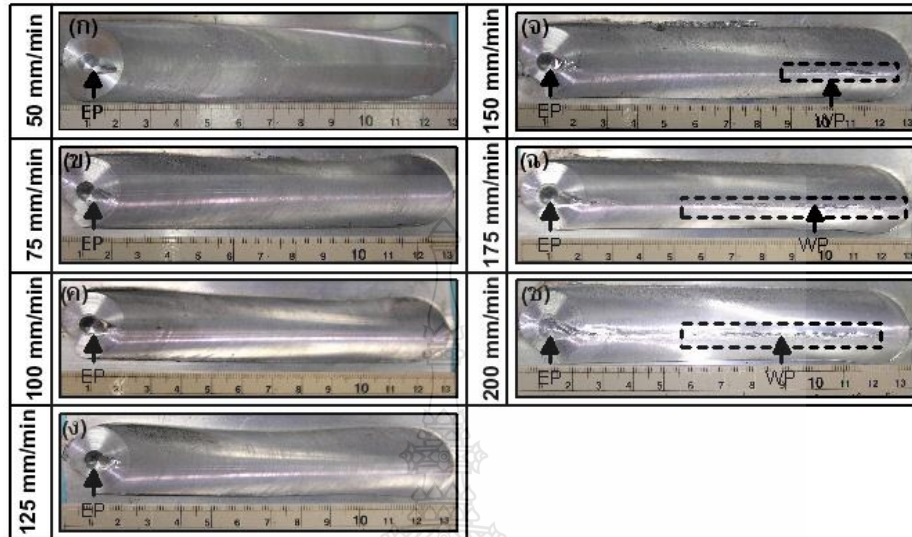
4.4.2 ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

- 4.4.3 บริเวณการฝึกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ
- 4.4.4 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค
- 4.4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา
- 4.5 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา
 - 4.5.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา
 - 4.5.2 ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว
 - 4.5.3 บริเวณการฝึกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ
 - 4.5.4 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค
 - 4.5.5 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค
- 4.6 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา
 - 4.6.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา
 - 4.6.2 ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว
 - 4.6.3 บริเวณการฝึกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ
 - 4.6.4 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค
 - 4.6.5 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค
- 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของตัวกวนรูปร่างชนิดต่างๆ
- 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวกวนรูปร่างชนิดต่างๆ



4.1 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ

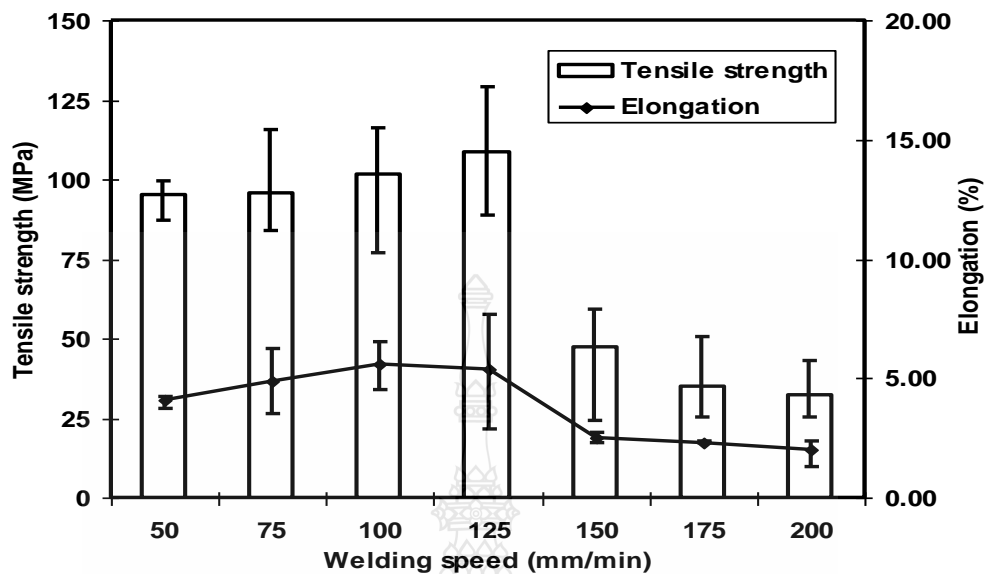
4.1.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา



รูปที่ 4.1 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ค่า EP = จุดบกพร่องที่จุดสุดท้าย และค่า WP = จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยมิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.1 จากผลการทดสอบ บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อมพบจุดบกพร่องสองลักษณะ คือ จุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม (EP) และจุดบกพร่องบนผิวหน้าแนวเชื่อม (WP) ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที การเกิดจุดบกพร่องของแนวเชื่อมนั้นเนื่องจากรูปร่างตัวกวนเป็นชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ มุมฉีกในการแทรกปลายของตัวกวนลงบนชิ้นงานมีมุมใหญ่ ขณะเริ่มต้นกระบวนการเชื่อม ความร้อนในการเสียดทานระหว่างเนื้อวัสดุกับตัวกวนและบ่าเครื่องมือเชื่อมยังมีน้อย ทำให้การรวมตัวกันของเนื้อวัสดุไม่ดีพอ ซึ่งช้ากว่าความเร็วในการเดินเชื่อม ทำให้เกิดโพรงและช่องว่างในแนวเชื่อมจนเกิดจุดบกพร่องขึ้น มีผลทำให้แนวเชื่อมที่ได้ไม่สมบูรณ์เมื่อใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมมากกว่า 125 มิลลิเมตร/นาที

4.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว



รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ

จากรูปที่ 4.2 ผลการทดสอบที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 108.33 MPa และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงต่ำสุด คือ 33.33 MPa ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด คือ 5.59 เปอร์เซ็นต์และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด คือ 2.06 เปอร์เซ็นต์ และจากการทดสอบค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของการทดสอบแนวเชื่อม ได้ผลที่ให้ค่าทดสอบที่แตกต่างกันที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ความเร็วในการเดินเชื่อม 50 มิลลิเมตร/นาที เมื่อเริ่มทำการเชื่อม ความเร็วในการเดินเชื่อมช้าทำให้เนื้อวัสดุที่ถูกกวนเริ่มได้รับความร้อนจากตัวกวน และบ่าเครื่องมือเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้เนื้อวัสดุที่ความเร็วในการเดินเชื่อมนี้ได้รับความร้อนมากกว่าความเร็วในการเดินเชื่อมอื่นๆ เนื้อวัสดุที่ได้รับความร้อนมากๆ การไหลวนเร็วมีผลทำให้เม็ดเกรนขยาย และมีขนาดใหญ่จึงส่งผลให้แนวเชื่อมมีความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อย

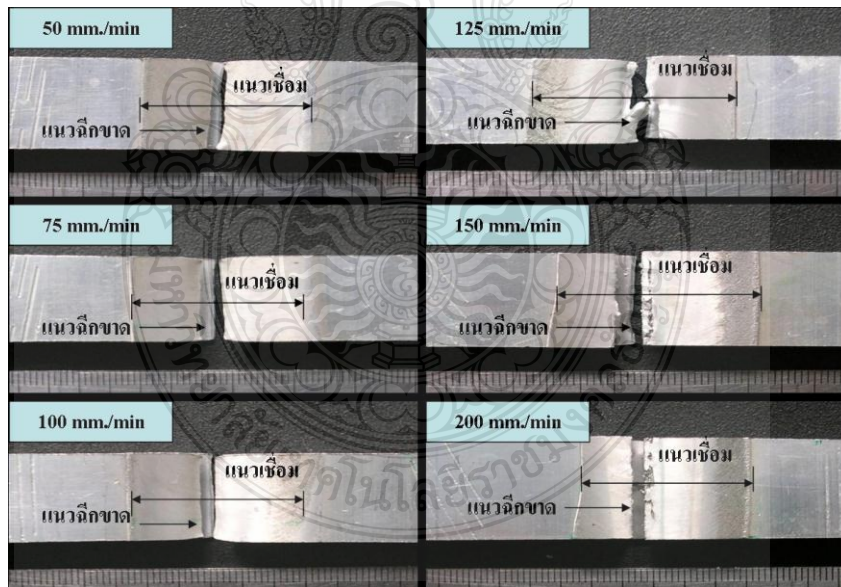
ความเร็วในการเดินเชื่อม 75 และ 100 มิลลิเมตร/นาที สังเกตเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 มิลลิเมตร/นาที แนวเชื่อมมีค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น ความร้อน

บริเวณเนื้อวัสดุที่ถูกกดลงน้อยลง ทำให้ขนาดเม็ดเกรนเล็กลง การเรียงตัวมีระเบียบขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อม ซึ่งทำให้ได้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน

ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที จากการวิเคราะห์สามารถเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดึงแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของแนวเชื่อมเริ่มต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมเร็วกว่าการรวมตัวของเนื้อวัสดุที่ถูกกดขณะไหลวน ทำให้การเกาะยึดของเม็ดเกรนมีการเรียงตัวสม่ำเสมอขึ้น ส่งผลให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยลงในด้านการยึดตัว

ความเร็วในการเดินเชื่อม 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ผลทดสอบที่ได้ เห็นว่าค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของแนวเชื่อมลดน้อยลงตามความเร็วในการเดินเชื่อมที่สูงขึ้น เนื่องจากตัวแปรในการเชื่อม คือ ความเร็วรอบของเครื่องมือเชื่อม อุณหภูมิ และความเร็วในการเดินเชื่อมไม่สมดุลกัน ทำให้การรวมตัวของเนื้อวัสดุภายในแนวเชื่อมเกิดโพรงและช่องว่างในแนวเชื่อมจนเกิดจุดบกพร่องขึ้น การเกาะยึดระหว่างเกรนไม่เป็นระเบียบ มีผลทำให้แนวเชื่อมที่ได้ไม่สมบูรณ์เมื่อใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมมากกว่า 125 มิลลิเมตร/นาที มีผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยลง

4.1.3 บริเวณการฉีกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ

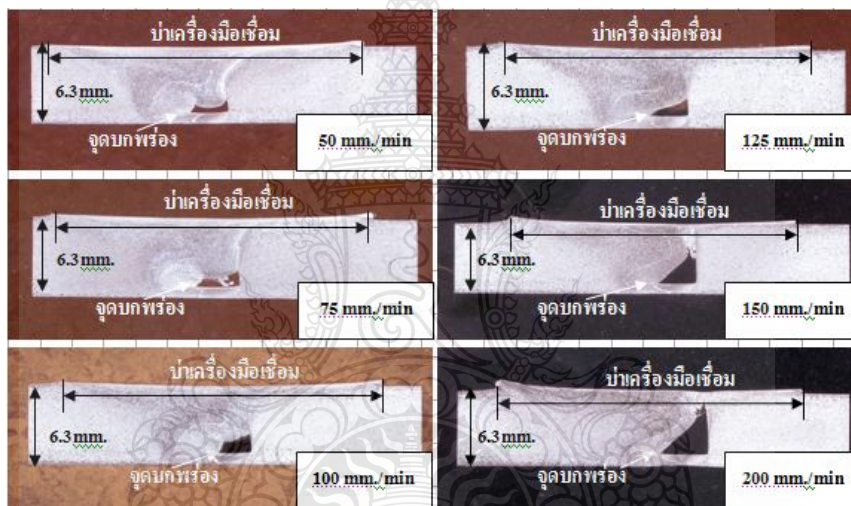


รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ

จากรูปที่ 4.3 ผลการดึงชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ชิ้นทดสอบจะขาดที่แนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม

เนื่องจากเครื่องมือเชื่อมมีลักษณะเป็นตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ ขณะเชื่อมเนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัวคล้ายของไหล การหมุนวนของเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน มีลักษณะเหวี่ยงออกรอบๆ ตามรูปร่างของตัวกวนทำให้เนื้อวัสดุไหลวนไม่ถึงปลายตัวกวนซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดช่องว่างและโพรงด้านล่างของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นช่องว่างจะขยายเพิ่มขึ้นด้วย การไหลวนของเนื้อวัสดุจะเกิดการฟุ้งเพราะความเร็วของผิวตัวกวน ทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุที่อยู่รอบๆ ตัวกวน และด้านหลังตัวกวนหมุนวน และไหลตามตัวกวนช้ากว่าความเร็วในการเดินเชื่อม ซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของตัวกวน ส่วนด้านบน ได้พบเครื่องมือเชื่อมเนื้อวัสดุจะได้รับแรงกดอัด จากการเกลี่ยของบ่าเครื่องมือเชื่อม ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.2

4.1.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ ที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 ผลการตรวจสอบจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม พบจุดบกพร่องทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้จุดบกพร่องมีแนวโน้มโตขึ้นด้วย

4.1.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ

ก. บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม พบจุดบกพร่อง และมีความเรียบสม่ำเสมอแต่ขนาดของรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ

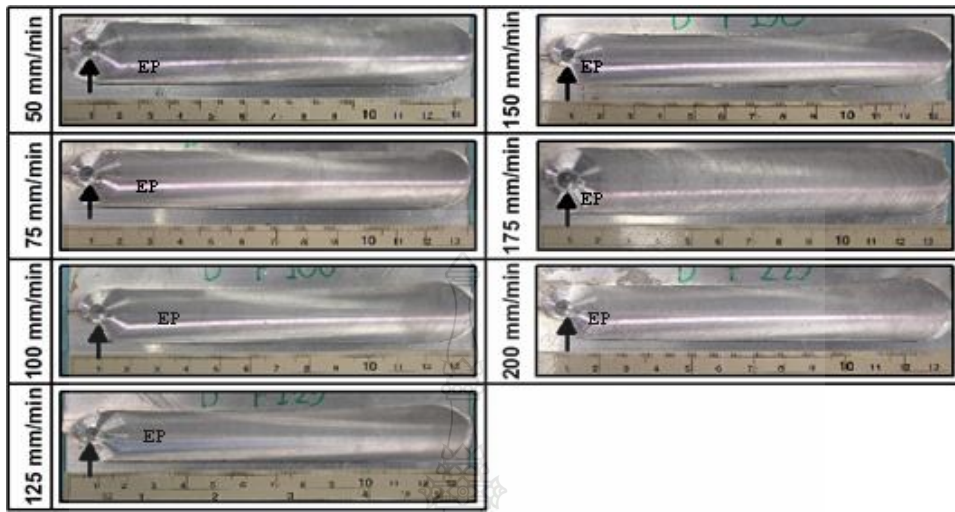
ข. ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 108.33 MPa และมี เฟอร์เซนต์การยึดตัวสูงสุด 5.29 เปอร์เซ็นต์

ค. การนิกขาดของแนวเชื่อม ขาดที่แนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม

ง. โครงสร้างมหภาค พบจุดบกพร่องทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม

4.2 ตั๊กวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ

4.2.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา

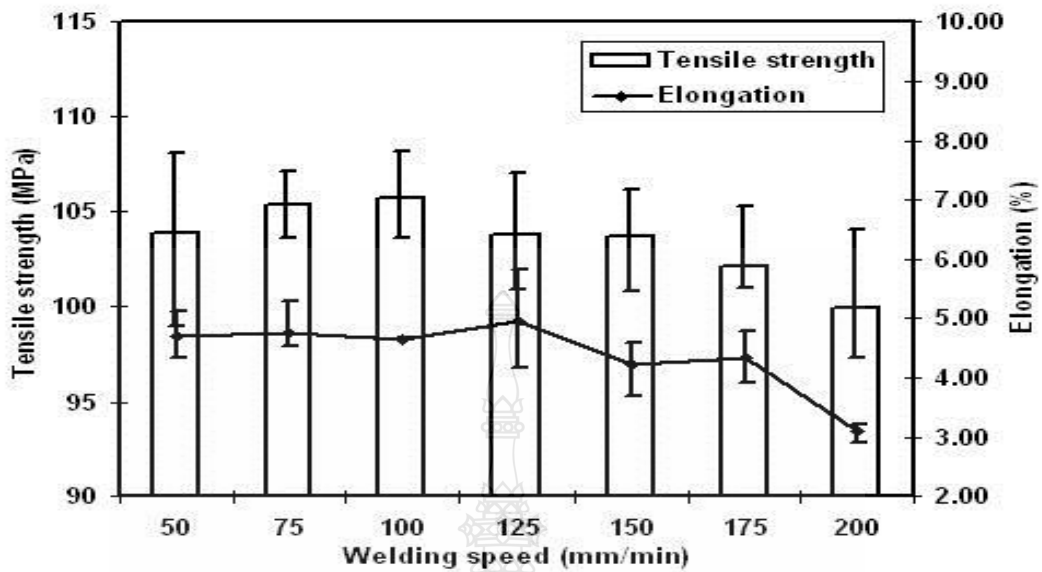


รูปที่ 4.5 ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตั๊กวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ
ค่า EP = จุดบกพร่องที่จุดสุดท้าย และค่า WP=จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยมิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.5 บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่องเลย เพราะปลายของตั๊กวนนั้นเล็ก ขณะที่ตั๊กวนเริ่มแทรกกลงไปที่เนื้อชิ้นงานเกิดรูหรือช่องที่มีขนาดเล็กจึงทำให้ป่าเครื่องมือเชื่อม (Shoulder) เกือบปิดช่องว่างนั้นจนหมด จึงไม่เกิดจุดบกพร่องดังกล่าว

เนื่องจากตั๊กวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบมีความเร็ว เมื่อตั๊กวนเริ่มแทรกกลงไปบนผิวชิ้นงาน ขณะเชื่อม ทำให้เนื้อวัสดุที่ถูกกวาดเกิดการแยกตัวออกด้านข้างตั๊กวน และกระจายขึ้นด้านบนผิวหน้าแนวเชื่อมในลักษณะบานออกเป็นรูปกรวยตามรูปร่างตั๊กวน และถูกดันกลับลงมาด้านล่างด้วยป่าเครื่องมือเชื่อม ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลวนมีระเบียบดีกว่าตั๊กวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบซึ่งเนื้อวัสดุที่ถูกกวาดจะถูกดันออกด้านข้างของตั๊กวนอย่างเดียว โดยสังเกตความแตกต่างของผิวหน้าแนวเชื่อมได้จากรูปที่ 4.1 และเปรียบเทียบผลการทดสอบได้จากรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นการนิโคขาดของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.7

4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว



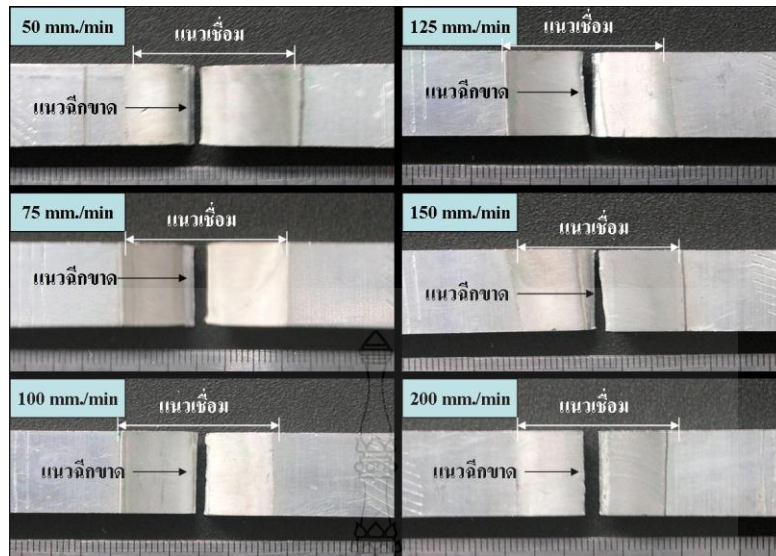
ปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ

จากรูปที่ 4.6 ผลการทดสอบที่ความเร็วในการเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 106.25 MPa และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงต่ำสุด คือ 99.58 MPa ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด คือ 4.92 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด คือ 3.08 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตัวกวนทำให้ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของการทดสอบเชื่อมมีค่าที่แตกต่างจากตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ความเร็วในการเดินเชื่อม 50, 75, และ 100 มิลลิเมตร/นาที เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดึงจะเพิ่มขึ้น และได้ค่าสูงสุดที่ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 100 มิลลิเมตร/นาที ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าใกล้เคียงกัน

ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที ค่าความต้านแรงดึงลดลงแต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวกวน ซึ่งมีผลต่อการไหลวนของเนื้อวัสดุที่ถูกกวน จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ เมื่อใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมเร็วกว่า 100 มิลลิเมตร/นาที คือ 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที ค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ และผิวหน้าแนวเชื่อมจะไม่พบจุดบกพร่องเลย เมื่อดูจากรูปที่ 4.5

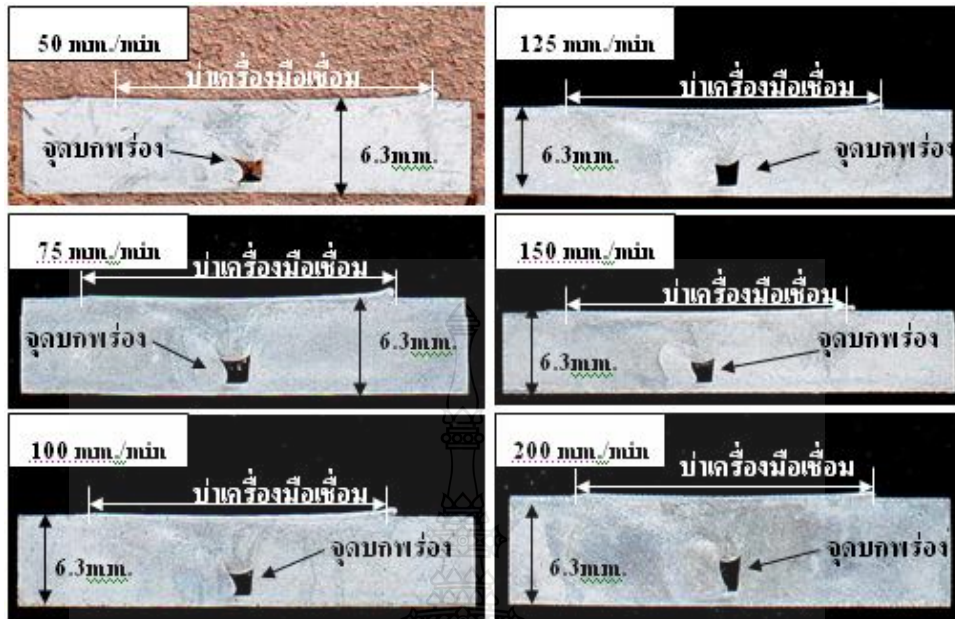
4.2.3 บริเวณการฉีกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบตัวกวนรูปกรวยผิวเรียบ

จากรูปที่ 4.7 ผลการดึงชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปกรวยผิวเรียบ ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ คือ ชิ้นทดสอบขาดที่แนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเชื่อม โดยมีสาเหตุจากตัวกวนมีผิวเรียบทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุที่ถูกกวนบางส่วนเกิดการฟริรอบตัวกวน ไหลวนไม่ถึงด้านล่างแนวเชื่อม โดยเฉพาะตรงส่วนปลายของตัวกวนจะเกิดช่องว่างและโพรงขึ้น โดยช่องว่างจะไม่ขยายใหญ่ขึ้นขณะความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม

4.2.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคของชั้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ ที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 ผลการตรวจสอบ พบจุดบกพร่องทุกสถานะความเร็วในการเดินเชื่อมโดยจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะคล้ายกับการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ

4.2.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ

ก. บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม ทุกสถานะความเร็วในการเดินเชื่อมไม่พบจุดบกพร่อง แนวเชื่อมมีความเรียบและมีผิวละเอียด

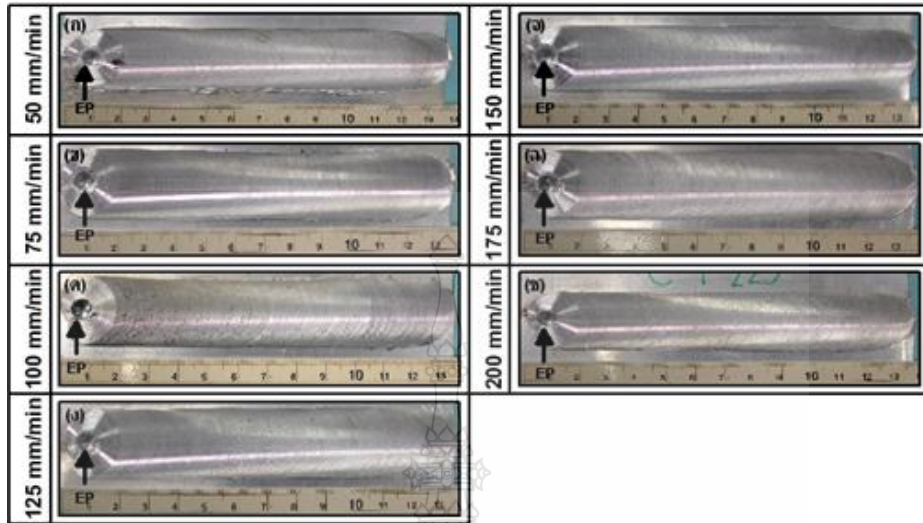
ข. ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 106.25 MPa และที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูงสุด 4.92 เปอร์เซ็นต์

ค. การรื้อขาดของแนวเชื่อม ขาดที่แนวเชื่อมทุกสถานะความเร็วในการเดินเชื่อม

ง. โครงสร้างมหภาค มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ทุกสถานะความเร็วในการเดินเชื่อม

4.3 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

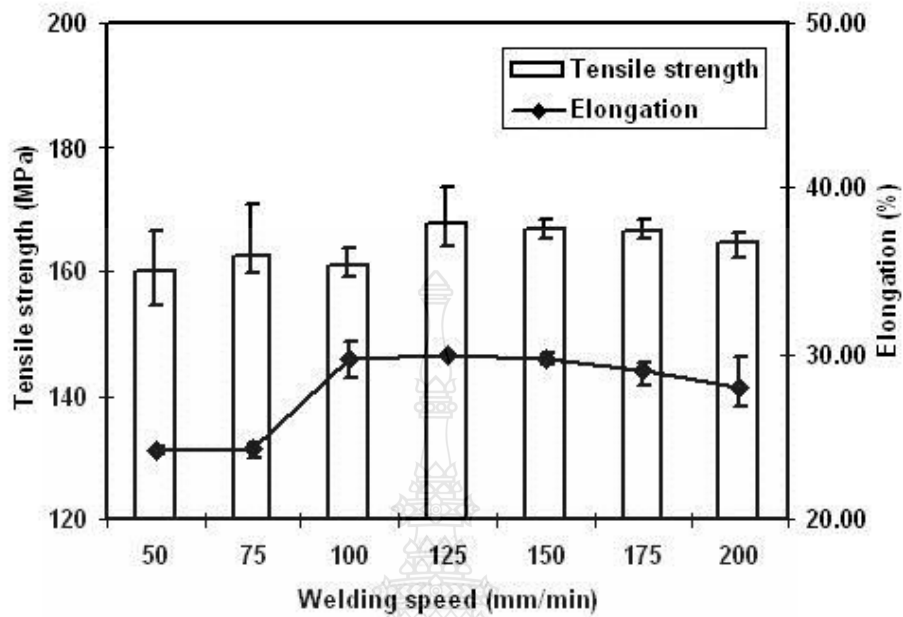
4.3.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา



รูปที่ 4.9 ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ค่าEP=จุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายและค่า WP=จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยมิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.9 จากการทดลองเชื่อมบริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่องบนผิวหน้าของแนวเชื่อม เพราะตัวกวนของสภาวะการเชื่อมนี้เป็นตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวซึ่งมีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อพิจารณาทิศทางการหมุนของตัวกวน ร่องเกลียวจะทำหน้าที่คล้ายกับร่องคายเศษของคอกสวน ในระหว่างการกวรร่องเกลียวของตัวกวนทำหน้าที่ดึงเนื้อโลหะที่อยู่ในสภาวะอ่อนตัว ไหลวนขึ้นมาแล้วอัดชนกับบ่าเครื่องมือเชื่อม (Shoulder) ทำให้เนื้อโลหะหมุนวนม้วนตัววนออกด้านข้าง และลง ไปด้วยด้านล่างตามทิศทางการหมุนของตัวกวนเมื่อมีเนื้อโลหะชุดใหม่มาแทนที่ จึงไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องที่ผิวหน้าแนวเชื่อม และการไหลวนของเนื้อโลหะที่ถูกกวเมื่อดูจากผิวหน้าแนวเชื่อม พบว่า ในแต่ละความเร็วในการเดินเชื่อมทำให้ความเรียบของผิวหน้าแนวเชื่อมมีความละเอียด ความหยาบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็ว ทิศทางการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปร่างของตัวกวน ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม

4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

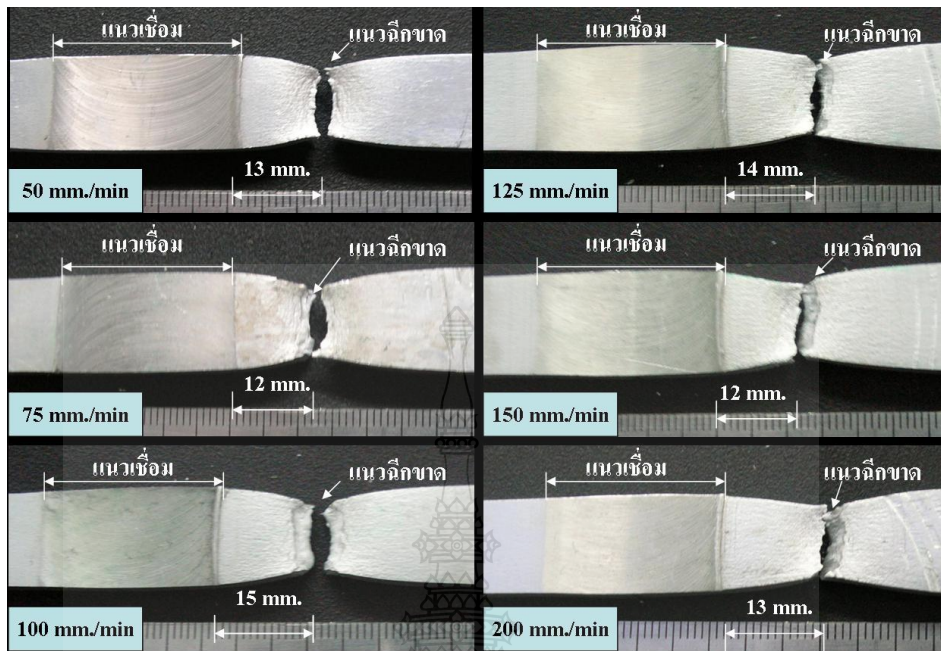


รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.10 ผลการทดสอบที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 167.86 MPa และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงต่ำสุด คือ 160.00 MPa ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด คือ 29.00 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด คือ 23.93 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแนวเชื่อมแต่ละสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 เพราะพื้นผิวของตัวกวนทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุที่ถูกกวนไม่เกิดการฟรี การไหลวนดีกว่า การเกาะยึด และการเรียงตัวของเม็ดเกรนมีระเบียบ ซึ่งมีผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.11

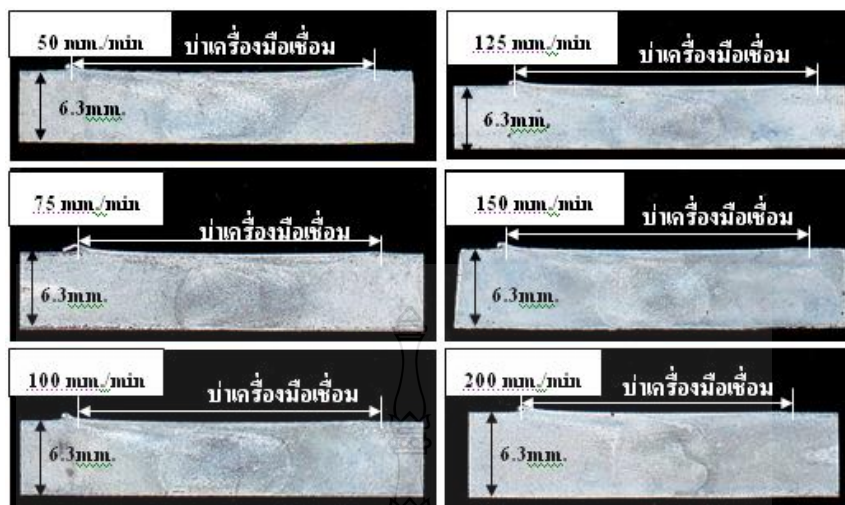
4.3.3 บริเวณการฉีกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.11 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา หลังการทดสอบแรงดึงชิ้นงาน พบว่า ชิ้นทดสอบเกิดการฉีกขาดที่วัสดุหลักห่างจากขอบของแนวเชื่อมประมาณ 12 - 15 มิลลิเมตร การฉีกขาดที่ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมจะฉีกขาดด้านรีทริทึง ส่วนที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 75 มิลลิเมตร/นาทีจะฉีกขาดด้านแอดวานซึ่งสาเหตุที่เกิดการฉีกขาดที่บริเวณดังกล่าวนี้เพราะวัสดุหลักได้รับความร้อนจากการเสียดทานระหว่างบ่าเครื่องมือเชื่อมกับผิวชิ้นงานตามทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการฉีกขาด และวัสดุหลักอาจมีจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุเอง สาเหตุที่ไม่เกิดการฉีกขาดที่แนวเชื่อมเพราะบริเวณแนวเชื่อม ไม่เกิดจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ที่เป็นสาเหตุของการพังทลาย

4.3.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

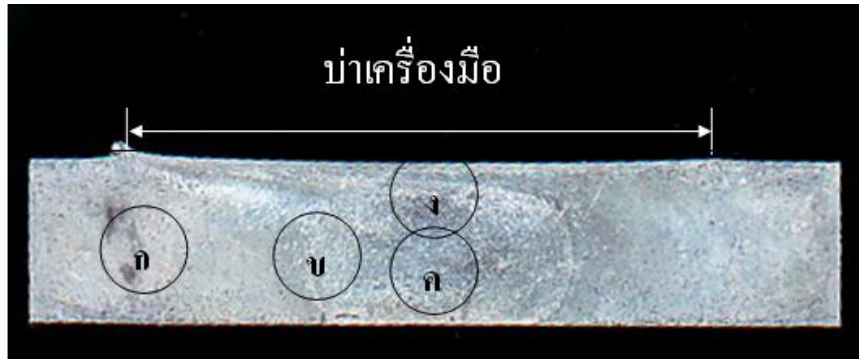


รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหภาคของชั้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 ผลการตรวจสอบ จุดบกพร่องภายในแนวเชื่อมไม่พบจุดบกพร่องใดๆ เลย เป็นเพราะเนื้อโลหะที่ไหลขึ้นมาตามร่องเกลียวได้ชนกับบ่าเครื่องมือเชื่อม (Shoulder) ได้ไหลกลับลงไปเนื่องจากบริเวณด้านบนได้รับความร้อนจากการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับบ่าเครื่องมือเชื่อม (Shoulder) ซึ่งเนื้อของวัสดุที่ถูกกวนยังอยู่ในสถานะอ่อนตัว จึงทำให้เนื้อวัสดุไหลกลับไปที่เดิมจึงไม่เกิดจุดบกพร่อง โดยสังเกตได้จากรูปที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 125 มิลลิเมตร/นาที และสังเกตได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.10

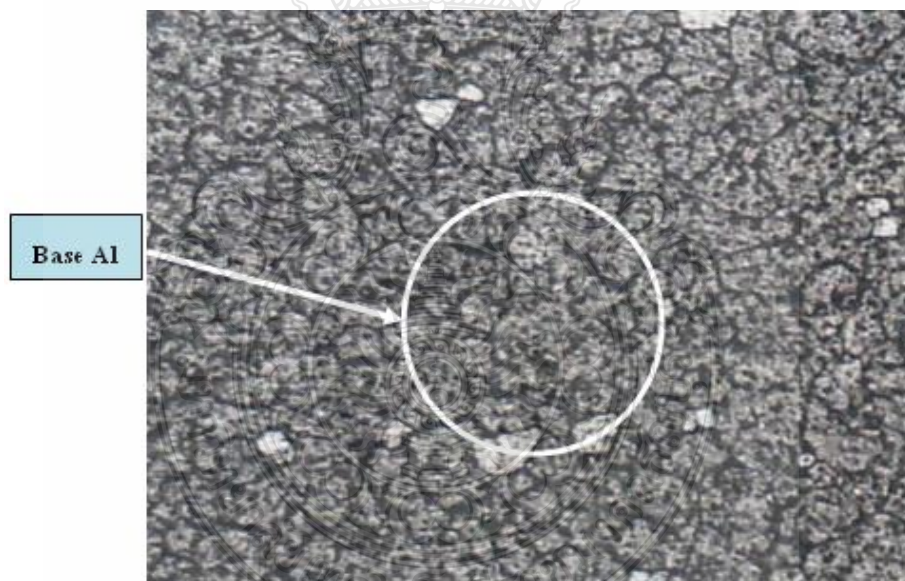
4.3.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

บริเวณที่เกิดการกวน (Stir Zone) คือ บริเวณที่เกิดการกวนขึ้นระหว่างตัวกวน (Stirrer) และชิ้นงานในระหว่างการกวนนี้เนื้ออลูมิเนียมจะอ่อนตัวโดยได้รับความร้อนจากบ่าเครื่องมือเชื่อม (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมแล้วไหลวนตามทิศทางการหมุนของตัวกวน



รูปที่ 4.13 พื้นที่ที่เกิดการกวนและพื้นที่ของอลูมิเนียมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [24]

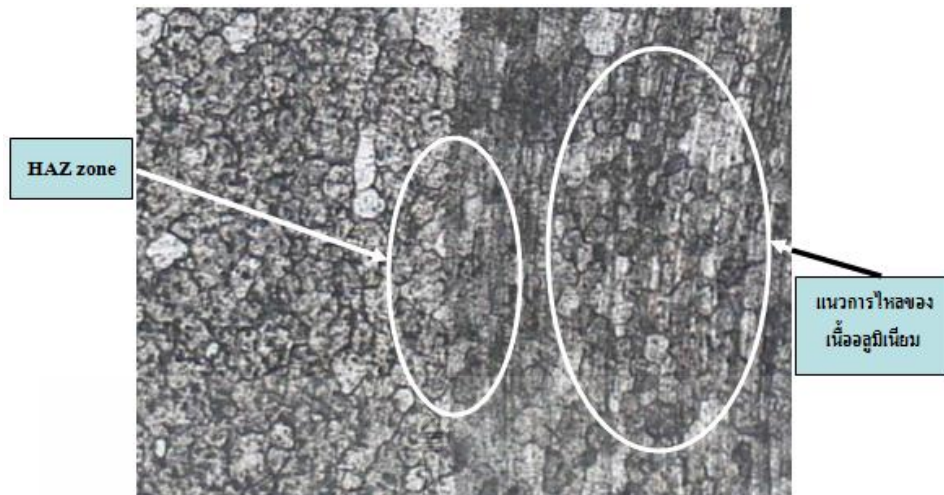
รูปที่ 4.13 เป็นโครงสร้างมหภาคของชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที โดยใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 125 มิลลิเมตร/นาที ตัวกวนเพียงทำมุมกับแนวเชื่อม 2 องศาและ ผู้จัดทำได้กำหนดจุดที่สามารถเห็นถึงบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์ทั้งสามปรากฏการณ์ได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.14 พื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมเดิมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณ (ก) [24]

บริเวณ ก เป็นเนื้อเดิมของอลูมิเนียมที่ไม่เกิดการกวนหรือได้รับอิทธิพลจากความร้อนของ เครื่องมือเชื่อม โดยสังเกตเห็นได้ว่าเม็ดเกรนของอลูมิเนียมมีการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบและ

สังเกตเห็นว่าบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) มีขนาดใหญ่เมื่อนำชิ้นทดลองดังกล่าวไป ทดสอบแรงดึงจะเกิดการขาดบริเวณนี้ยิ่งถ้าขอบเกรนมีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการขาดได้ ง่าย



รูปที่ 4.15 ขอบเขตระหว่างพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่การไหลของเนื้ออลูมิเนียมในบริเวณ (ข) [24]

บริเวณ ข เป็นบริเวณที่เกิดการกวนเกิดการไหลของเนื้ออลูมิเนียมที่เกิดจากเครื่องมือเชื่อมและบริเวณที่ได้รับความร้อนจากเครื่องมือเชื่อม สังกะยบริเวณแรกคือบริเวณที่ได้รับความร้อนจากเครื่องมือเชื่อม เม็ดเกรนมีการเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากกว่าบริเวณเนื้อเดิมของอลูมิเนียม (Base Aluminum) ขอบเกรนที่ได้มีขนาดเล็กกว่าเนื้อเดิมของอลูมิเนียม และสังกะยบริเวณที่เกิดการกวนขึ้นนั้นเกิดการไหลตัวของเนื้ออลูมิเนียม จนเกิดการเรียงตัวกันใหม่ของเม็ดเกรนที่มีความเป็นระเบียบและการอัดตัวรวมกันของเม็ดเกรนมากกว่าเนื้อเดิมของอลูมิเนียมและบริเวณที่ได้รับความร้อนจากเครื่องมือเชื่อม ส่งผลให้มีความแข็งแรงมากกว่าทำให้ไม่เกิดการขาดตรงแนวที่เกิดการกวน



รูปที่ 4.16 พื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมที่เกิดการกวนของเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ค) [24]

บริเวณ ค เป็นบริเวณที่เกิดการกวนจากเครื่องมือเชื่อม โดยเครื่องมือเชื่อมเดินผ่านบริเวณนี้ เม็ดเกรนมีการอัดรวมตัวกัน และขอบเกรนมีขนาดเล็กลงเกิดจากการที่เนื้ออลูมิเนียมมวลตัวรวมกัน และในขณะเดียวกันก็อัดรวมตัวกันทำให้ได้เม็ดเกรนดังรูปที่ 4.16 ความแข็งแรงจึงเพิ่มขึ้นและสามารถทนแรงดึงได้มากกว่าเนื้อของอลูมิเนียมเดิม



รูปที่ 4.17 ขอบเขตระหว่างพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมที่เกิดการกวนของเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ง) [24]

บริเวณ ง เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat Affect Zone) จะเห็นได้ว่ามีสีของบริเวณดังกล่าวเป็นสีน้ำตาลจนเป็นสีดำไล่ขึ้นไปบนผิวด้านบนเกิดจากการเสียดสีระหว่างปาเครื่องมือเชื่อมกับชิ้นงานหลังจากที่ตัวกวนเดินผ่านไป แล้ว และเม็ดเกรนมีขนาดเล็กลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะเนื้ออลูมิเนียมได้รับการเป็ยคอัด และเนื่องมาจากปาเครื่องมือเชื่อมบวกกับแรงกดคั้นที่เกิดขึ้นระหว่างการไหลตัวของเนื้ออลูมิเนียมเองจึงทำให้เกิดการเรียงตัวของเม็ดเกรนใหม่ได้เม็ดเกรนที่เล็กลงดังรูปที่ 4.17

4.3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

ก. ผิวหน้าแนวเชื่อม ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมไม่พบจุดบกพร่อง แนวเชื่อมมีความเรียบ และมีผิวหยาบ

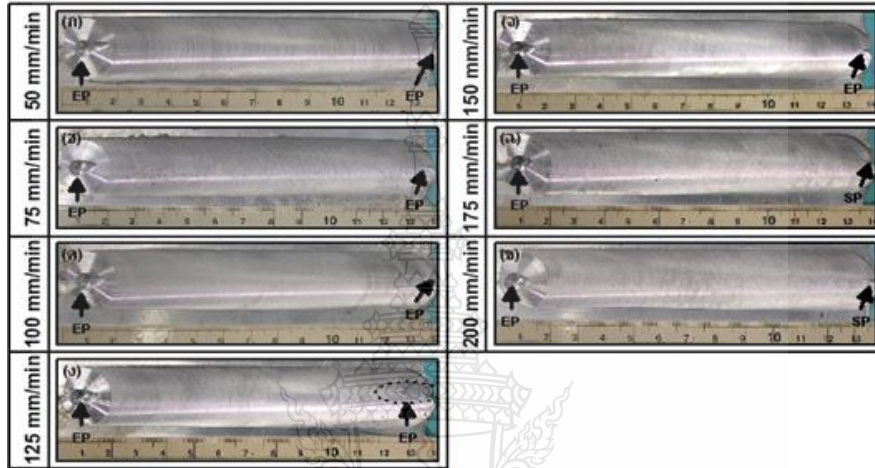
ข. ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 167.86 MPa และมี เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 29 เปอร์เซ็นต์

ค. การฉีกขาดของแนวเชื่อม จะขาดที่วัสดุหลัก ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม และวัสดุหลักได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อมน้อย

ง. โครงสร้างมหภาค ไม่พบจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม

4.4 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา

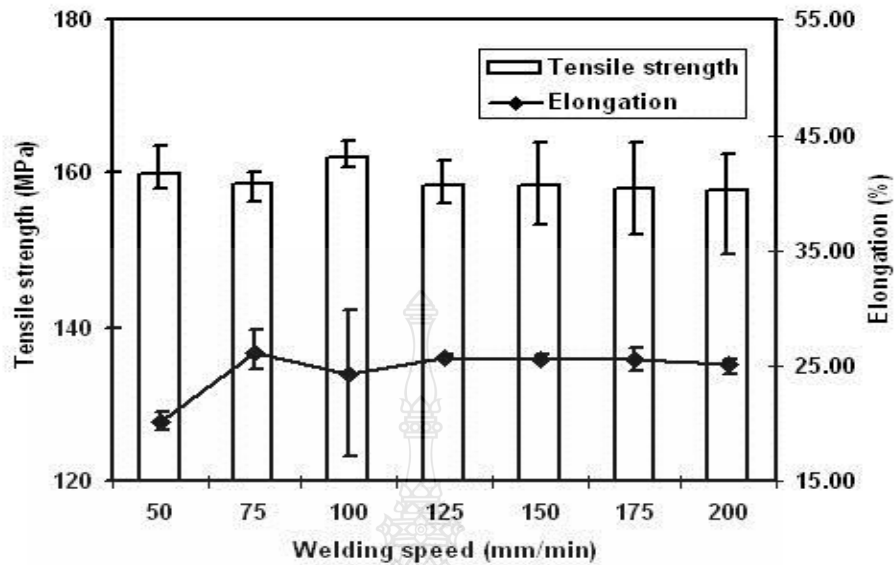
4.4.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา



รูปที่ 4.18 ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ค่า EP = จุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายและค่า WP = จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยมิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.18 บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม พบจุดบกพร่องเล็กๆ บนผิวหน้าของแนวเชื่อม (EP) เนื่องจากตัวกวนในสภาวะนี้เป็นตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา การหมุนลักษณะนี้ร่องเกลียวก็ทำหน้าที่คล้ายร่องคายเศษเหมือนกันแต่ร่องเกลียวจะคายเศษลงด้านล่างแนวเชื่อมแทน จุดบกพร่องดังกล่าวเกิดขึ้นที่บริเวณจุดเริ่มต้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะจุดบกพร่องเกิดขึ้นเนื่องจากการคายเศษของตัวกวนซึ่งคายเศษลงด้านล่าง หรือเนื้อวัสดุที่ถูกกวนยังไม่ได้รับความร้อนเพียงพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัว และไหลวนรวมตัวกันอย่างสมบูรณ์

4.4.2 ผลการทดสอบแรงดึงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

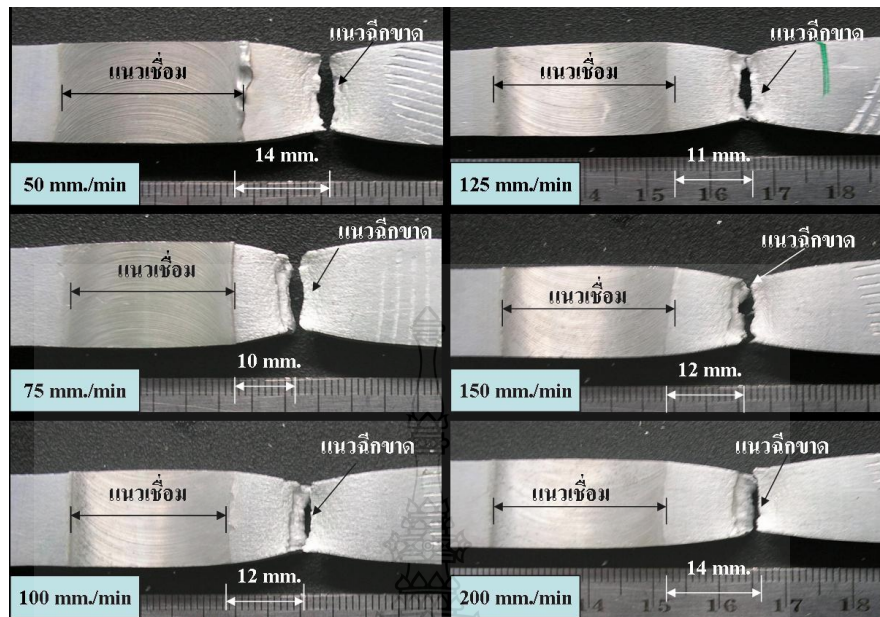


รูปที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.19 ผลการทดสอบที่ความเร็วในการเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 162.08 MPa และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงต่ำสุด คือ 157.50 MPa ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 75 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด คือ 26.07 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาที มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด คือ 20.00 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ของแนวเชื่อมแต่ละสถานะความเร็วในการเดินเชื่อมมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ทุกสถานะความเร็วในการเดินเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.10 เพราะการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของตัวกวนทำให้เนื้อวัสดุที่ถูกกวนขณะเริ่มแรกได้รับความร้อนจากการเสียดทานระหว่างปาเครื่องมือเชื่อมกับผิวของชิ้นงาน และระหว่างตัวกวนกับเนื้อวัสดุน้อย ทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุด้านล่างแนวเชื่อมรวมตัวกันได้ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.21

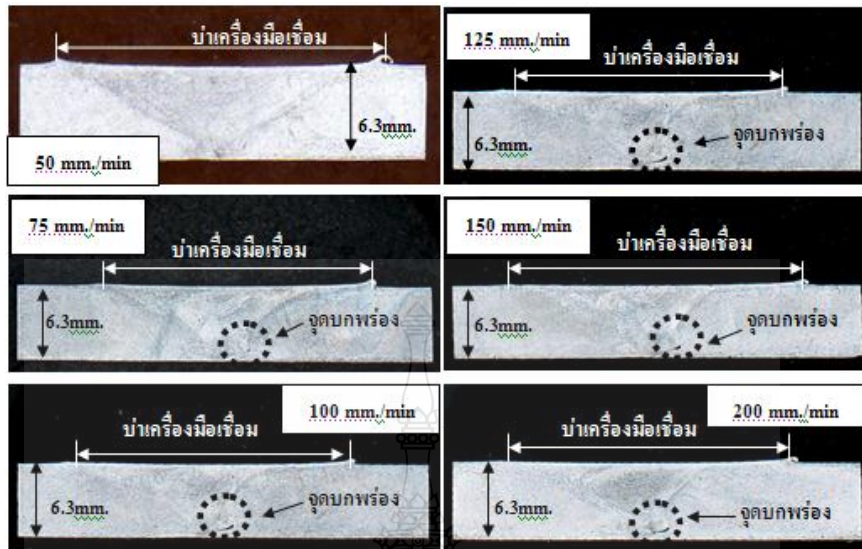
4.4.3 บริเวณการฉีกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวน เข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.20 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา หลังการทดสอบแรงดึงชิ้นงาน พบว่า ชิ้นทดสอบเกิดการฉีกขาดที่วัสดุหลักห่างจากขอบของแนวเชื่อมประมาณ 12 - 14 มิลลิเมตร การฉีกขาดที่ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมจะฉีกขาดด้านแอดวานซ์ ซึ่ง ส่วนที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 50, 75 มิลลิเมตร/นาที จะฉีกขาดด้านรีทริทึง สาเหตุที่เกิดการฉีกขาดที่บริเวณดังกล่าวนี้เพราะวัสดุหลักได้รับความร้อนจากการเสียดทานระหว่างบ่าเครื่องมือเชื่อมกับผิวชิ้นงานตามทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการฉีกขาด และวัสดุหลักอาจมีจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุเอง สาเหตุที่ไม่เกิดการฉีกขาดที่แนวเชื่อมเพราะบริเวณแนวเชื่อมไม่เกิดจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ที่เป็นสาเหตุของการพังทลาย

4.4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 4.21 โครงสร้างมหภาคของชั้นทดลองเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

จากรูปที่ 4.21 ผลการตรวจสอบ ภายในแนวเชื่อม พบจุดบกพร่องทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ยกเว้นสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาที ไม่พบจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ซึ่งจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อมดังกล่าวเมื่อนำไปทดสอบค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว สามารถแสดงให้เห็นได้ว่ามีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.20

4.4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา

ก. ผิวหน้าแนวเชื่อม พบจุดบกพร่องบริเวณที่จุดเริ่มต้นของแนวเชื่อม โดยเฉพาะที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 125 มิลลิเมตร/นาที แนวเชื่อมมีความเรียบ และมีผิวละเอียด

ข. ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 162.08 MPa และที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 75 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 26.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของการเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าต่ำกว่า คือ 24.29 เปอร์เซ็นต์

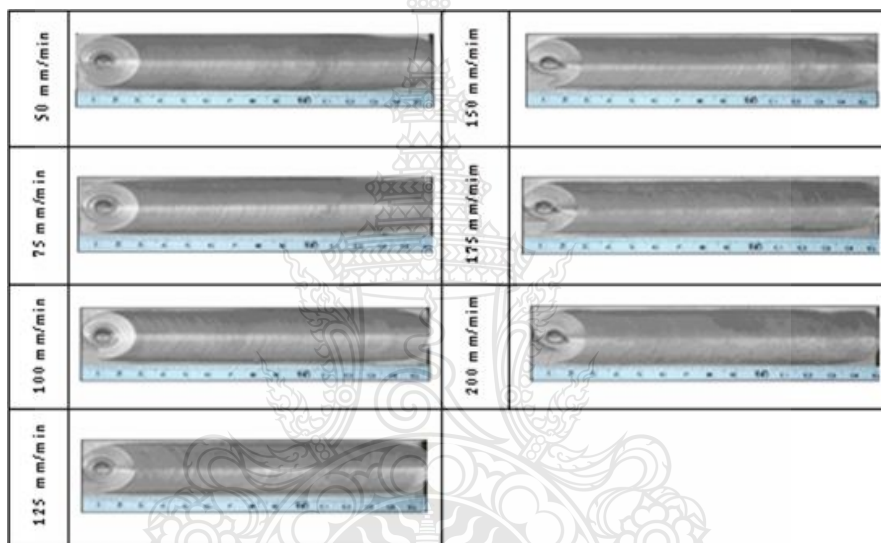
ค. การนิยาคของแนวเชื่อม จะขาดที่วัสดุหลัก ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม และวัสดุหลักได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อมมากกว่าตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

ง. โครงสร้างมหภาค มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ยกเว้นที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาที ไม่พบจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม

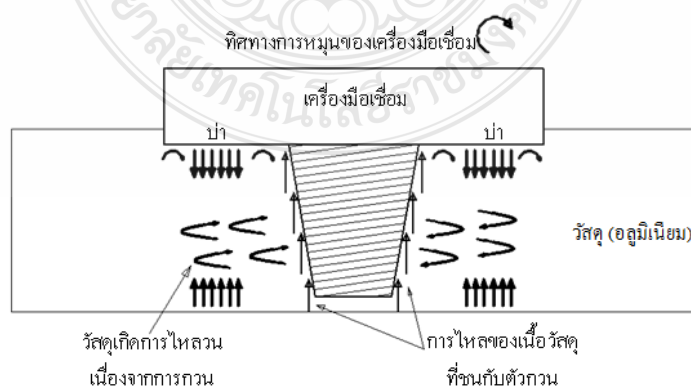
4.5 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

จากชั้นทดลองอลูมิเนียมผสม 6063-T1 ที่เชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ในการต่อชนทำราบที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที และบ่าของเครื่องเชื่อม (Shoulder) ทำมุมเอียงกับผิวชิ้นงาน 2 องศา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ โดยผลการวิเคราะห์มีดังนี้

4.5.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา



รูปที่ 4.22 ผิวหน้าของแนวเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

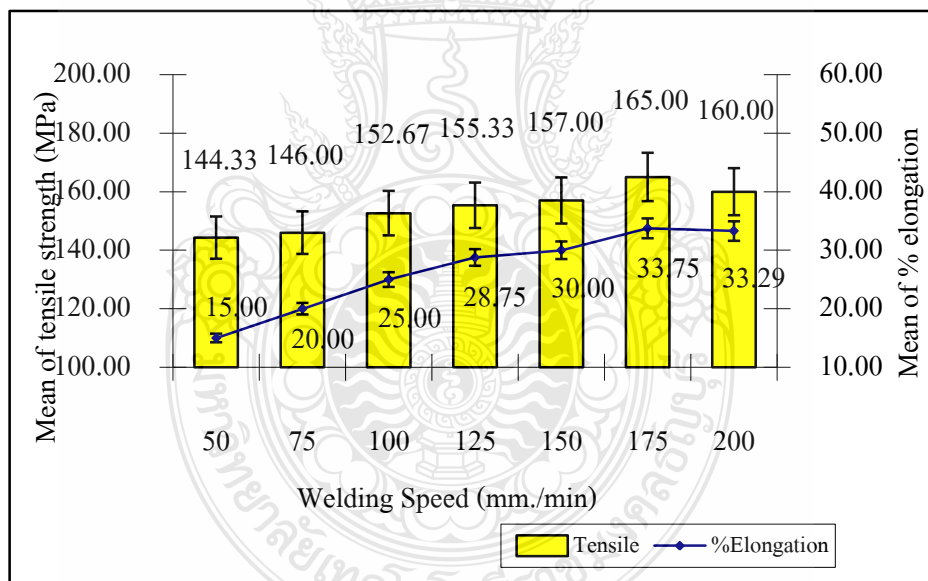


รูปที่ 4.23 การไหลวนของเนื้อวัสดุที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา พบว่า ผิวหน้าแนวเชื่อมด้านบนมีลักษณะขรุขระที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำ เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมสูงขึ้นผิวหน้าแนวเชื่อมด้านบนมีลักษณะเรียบขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ขณะที่เกิดการหมุนวน และความเร็วในการเดินเชื่อม เส้นสันเกลียวของตัวกวนจะดึงเนื้อวัสดุขึ้นมายังปากเครื่องมือเชื่อม และเนื้อวัสดุที่ถูกกวนหมุนวนกลับไปยังด้านล่างของแนวเชื่อม ด้วยแรงกดของปากเครื่องมือเชื่อม เมื่อมีเนื้อโลหะชุดใหม่มาแทนที่ ส่วนด้านบนแนวเชื่อมจะถูกเกลี่ยให้เรียบด้วยปากเครื่องมือเชื่อม และบริเวณผิวหน้าแนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม คือ 50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที ไม่พบจุดบกพร่องของแนวเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวทำให้อุณหภูมิของการเชื่อมเกิดการเคลื่อนที่ และไหลวนอย่างรุนแรงจากเส้นสันเกลียวจึงทำให้การรวมตัวของเนื้อวัสดุมีความสมบูรณ์

4.5.2 ผลการทดสอบแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 4.24

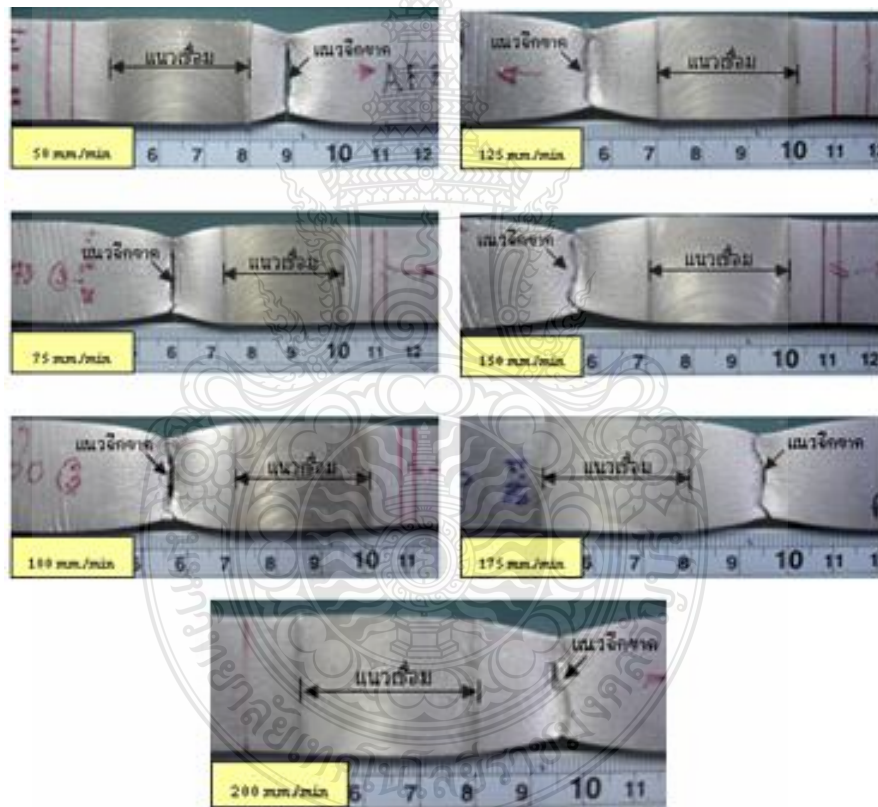


รูปที่ 4.24 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม ที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.24 พบว่า ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 175 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ 165.00 MPa และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด คือ 144.33 MPa ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 175 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด คือ 33.75 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเฉลี่ย

ของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวต่ำที่สุด คือ 15.00 เปอร์เซ็นต์ และจากผลการทดสอบเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมขึ้นครั้งละ 25 มิลลิเมตร/นาที ค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวก็สูงขึ้นด้วยเพราะในแต่ละความเร็วในการเดินเชื่อม การไหลวนของเนื้อวัสดุที่ถูกกวรอบๆ ตัวกวนก็เปลี่ยนแปลงตามความเร็วในการเดินเชื่อมด้วย ความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำทำให้เกิดความร้อนมาก ขนาดของเม็ดเกรนก็ใหญ่ การเกาะยึดระหว่างเม็ดเกรนน้อยทำให้ความแข็งแรงต่ำ ความเร็วในการเดินเชื่อมสูงขึ้นทำให้ความร้อนลดลง ขนาดของเม็ดเกรนก็เล็กลง การเกาะยึดระหว่างเม็ดเกรนเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเดินเชื่อมสูงมากเกินไปการรวมตัวของเนื้อวัสดุที่ถูกกวรวมตัวกันไม่ทันทำให้การเรียงตัวของเม็ดเกรนมีความเป็นระเบียบน้อยลง ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมลดลง

4.5.3 บริเวณการฉีกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ

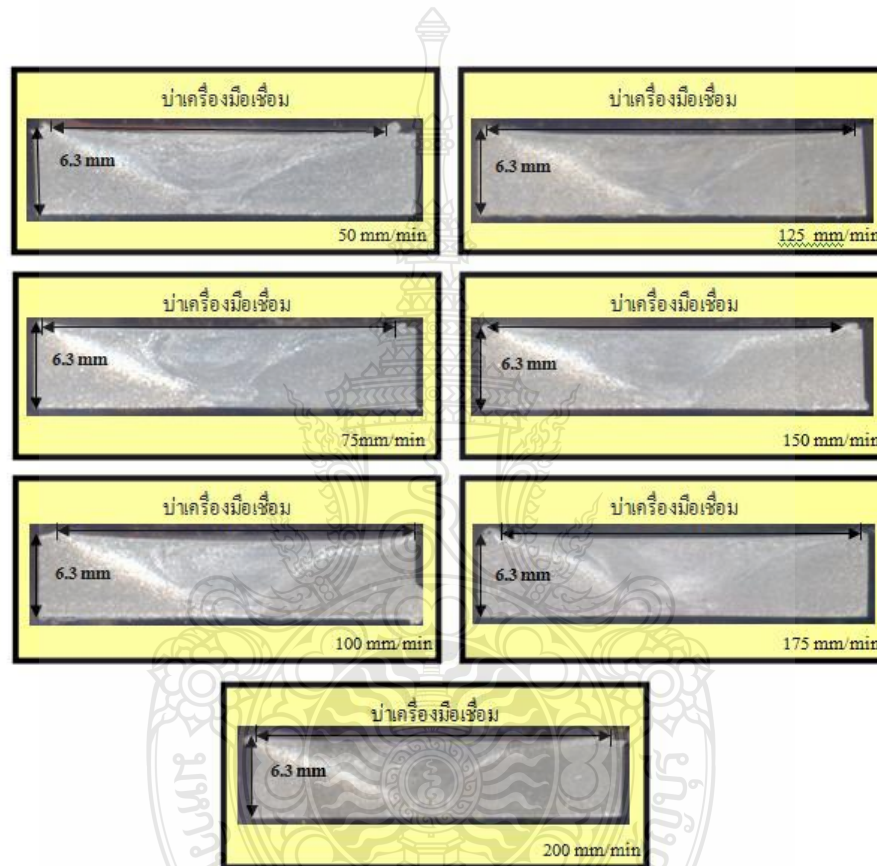


รูปที่ 4.25 บริเวณจุดขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลม แบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

จากรูปที่ 4.25 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา หลังการทดสอบแรงดึงชิ้นงาน พบว่า ชิ้นทดสอบเกิดการฉีกขาดที่วัสดุหลักห่างจากขอบของแนวเชื่อมประมาณ 12 - 15 มิลลิเมตร การฉีกขาดที่สภาวะความเร็วในการเดิน

เชื่อม 50, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที จะนิยมนำด้านแอดวานซึ่ง ส่วนที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 75, 100, 125 และ 150 มิลลิเมตร/นาที จะนิยมนำด้านรีทริทซึ่ง สาเหตุที่เกิดการร้าวที่บริเวณดังกล่าว นั้นเพราะวัสดุหลักได้รับความร้อนจากการเสียดทานระหว่างบ่าเครื่องมือเชื่อมกับผิวชิ้นงานตามทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการร้าว และวัสดุหลักอาจมีจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุเอง สาเหตุที่ไม่เกิดการร้าวที่แนวเชื่อมเพราะบริเวณแนวเชื่อมไม่เกิดจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ที่เป็นสาเหตุของการพังทลาย

4.5.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

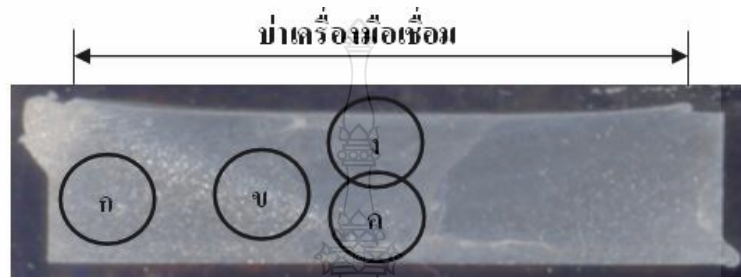


รูปที่ 4.26 โครงสร้างมหภาค ของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลม แบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

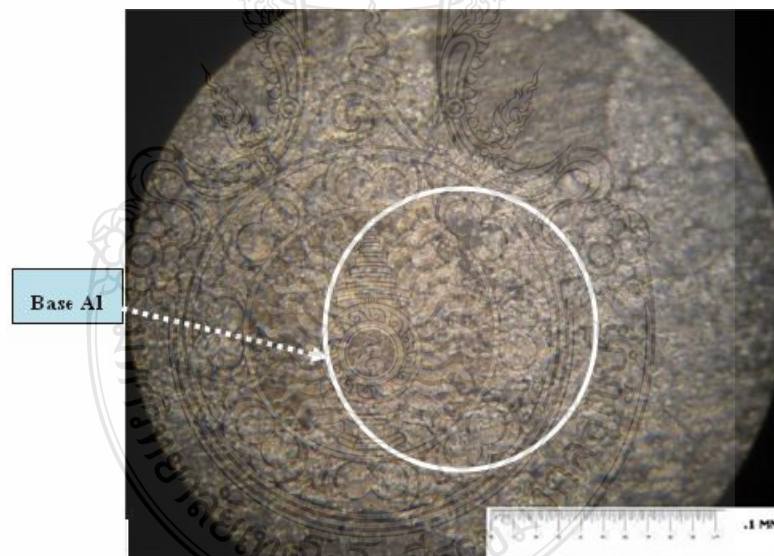
จากรูปที่ 4.26 จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลม แบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ไม่พบจุดบกพร่องบริเวณแนวเชื่อม และการร้าวของชิ้นทดสอบ จะร้าวที่วัสดุหลัก ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.25

4.5.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวิทยานิพนธ์ในบทนี้จะวิเคราะห์เฉพาะชิ้นทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที เท่านั้น คือ ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวน ชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 165.00 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 33.75 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 175 มิลลิเมตร/นาที

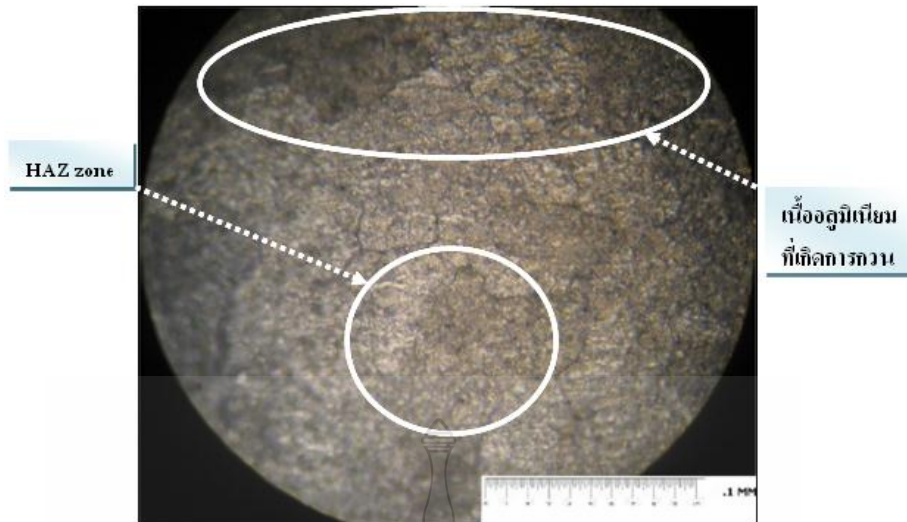


รูปที่ 4.27 พื้นที่ที่เกิดการกวนและพื้นที่ของวัสดุหลักที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



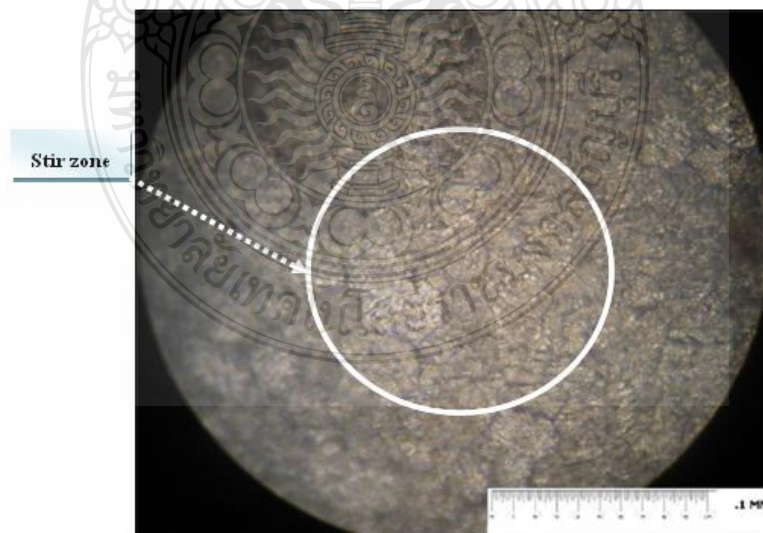
รูปที่ 4.28 พื้นที่ของเนื้อวัสดุหลักที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในบริเวณ (ก) (กำลังขยาย 600 เท่า)

จากรูปที่ 4.28 เป็นบริเวณพื้นที่ใต้บ่าเครื่องมือเชื่อมด้านแอดวานซึ่งเป็นจุดที่อยู่ห่างจากบ่าเครื่องมือเชื่อม และตัวกวน การไหลวนทำให้เนื้อวัสดุหลักบริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าบริเวณอื่น เห็นได้ว่าเม็ดเกรนจะมีขนาดใหญ่ เพราะเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนจากการหมุนกวนและความร้อนจากบ่าเครื่องมือเชื่อมในขณะเชื่อมน้อย ทำให้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดเกรนบริเวณนี้



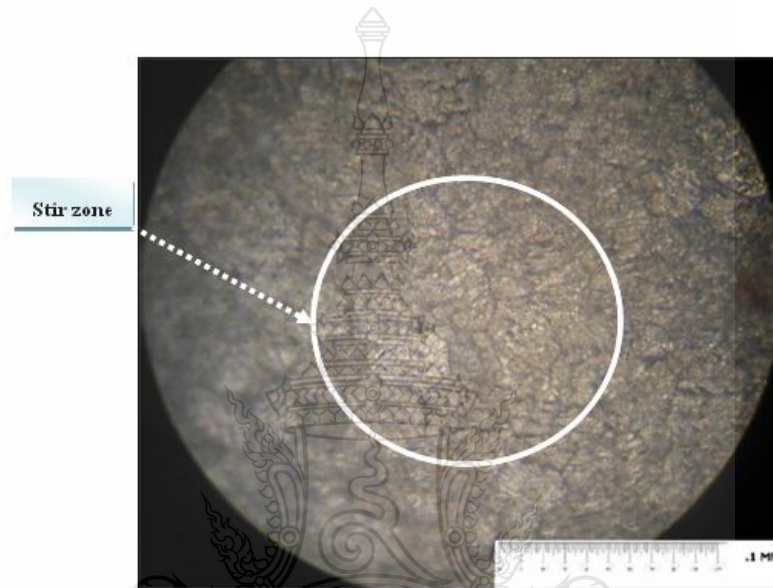
รูปที่ 4.29 พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่การไหลของเนื้อวัสดุหลัก
ในบริเวณ (ข) (กำลังขยาย 600 เท่า)

จากรูปที่ 4.29 เป็นบริเวณพื้นที่ที่อยู่ใกล้ตัวกวน และใกล้บริเวณกระทันร้อนมากกว่า
บริเวณ ก. มีผลทำให้เนื้อวัสดุหลักมีการอ่อนตัวเพิ่มขึ้นทำให้เม็ดเกรนมีการเรียงตัวกันเป็นระเบียบ
มากขึ้นและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อวัสดุหลักในบริเวณ ก. การไหลวนของเนื้อวัสดุหลักดีกว่า มีผลทำ
ให้ความแข็งแรงของเม็ดเกรนเพิ่มขึ้น การไหลวนของเนื้อวัสดุหลักจะไหลผ่านไปยังด้านหน้าตัวกวน
ตามทิศทางการหมุนของตัวกวน และไหลต่อเนื่องไปทางด้านรีทอร์ทิ่ง



รูปที่ 4.30 พื้นที่ของเนื้อวัสดุหลักที่เกิดการกววนของเครื่องมือเชื่อม ในบริเวณ (ค)
(กำลังขยาย 600 เท่า)

จากรูปที่ 4.30 เป็นบริเวณรอยต่อ ตรงจุดฐานรากของแนวเชื่อมเป็นจุดที่เนื้อวัสดุหลักเกิดการไหลวนมาจากด้านแอดวานซิ่ง และด้านรีทริททิง เมื่อเกิดการกวนและไหลวน เนื้อวัสดุหลักที่เคลื่อนที่ชนกับตัวกวนจะถูกดึงขึ้นไปทางด้านบนของแนวเชื่อมตามเส้นสันเกลียวในทิศทางการหมุนของตัวกวน ทำให้จุดนี้ มีทั้ง การหมุนกวน และการไหลวนของเนื้อวัสดุหลักรอบๆ ตัวกวน การเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุหลัก มีผลทำให้เม็ดเกรนที่ฐานรากแนวเชื่อม ถึงจุดกึ่งกลางแนวเชื่อม มีขนาดเล็ก และเป็นระเบียบมากกว่าบริเวณ ก. และบริเวณ ข. ของแนวเชื่อม มีผลทำให้แนวเชื่อมที่บริเวณ ค. มีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่น



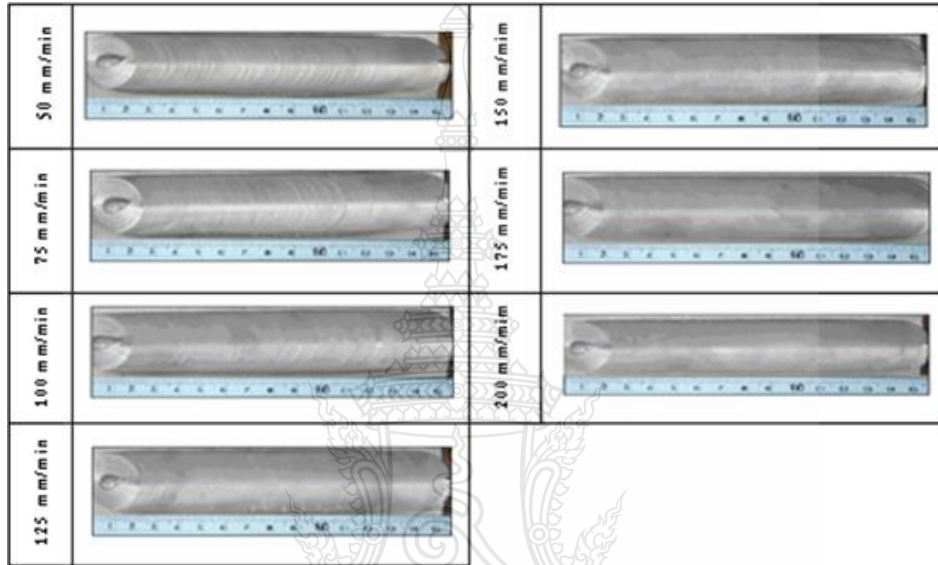
รูปที่ 4.31 พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อม และพื้นที่ของเนื้อวัสดุหลักที่เกิดการกวนได้บ่าเครื่องมือเชื่อม ในบริเวณ (ง) (กำลังขยาย 600 เท่า)

จากรูปที่ 4.31 เป็นบริเวณรอยต่อที่อยู่ใกล้กับบ่าเครื่องมือเชื่อมมากกว่าบริเวณอื่นเป็นบริเวณที่เนื้อวัสดุหลักเกิดการหมุนกวน และไหลวน ขึ้นมาถึงบริเวณได้บ่าเครื่องมือเชื่อม บริเวณนี้นอกจากจะมีการหมุนกวน การไหลวน การดึงเนื้ออลูมิเนียมตามเส้นสันเกลียวของตัวกวนแล้วยังได้รับแรงกดอัด จากบ่าเครื่องมือเชื่อม ทำให้บริเวณนี้ได้รับความร้อน และแรงกดอัดจากการหมุนระหว่างบ่าเครื่องมือเชื่อมกับผิวหน้าชิ้นงานเชื่อมมากกว่าบริเวณอื่น ทำให้การเกาะยึดระหว่างเม็ดเกรนมีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่น

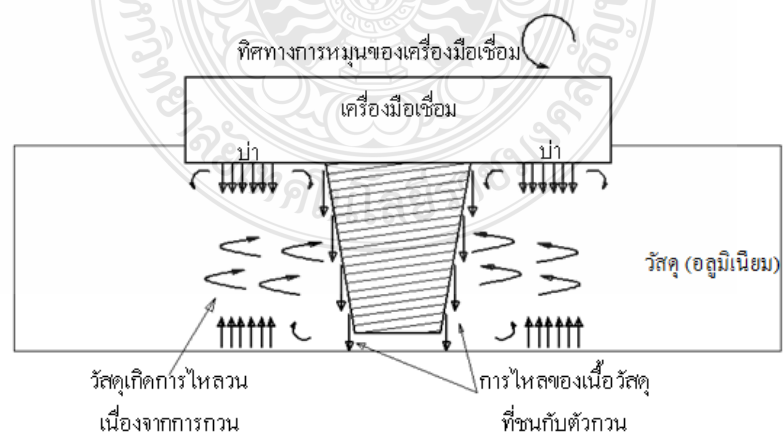
4.6 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากชั้นทดลองเชื่อมอลูมิเนียมผสม 6063-T1 ที่เชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ด้วยตัวกวนชนิด รูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ในการต่อชนทำราบที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที และบ่าของเครื่องเชื่อม (Shoulder) ทำมุมเอียงกับของชิ้นงาน 2 องศา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ โดยผลการวิเคราะห์มีดังนี้

4.6.1 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา



รูปที่ 4.32 ผิวหน้าของแนวเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

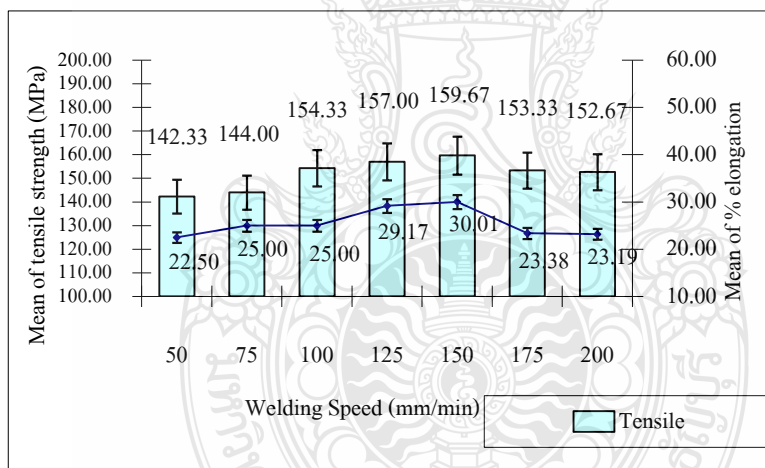


รูปที่ 4.33 การไหลวนของเนื้อวัสดุที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33 ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา พบว่าผิวหน้าแนวเชื่อมด้านบนมีลักษณะเรียบ ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมยิ่งสูง ความเรียบที่ผิวหน้าของแนวเชื่อมจะเรียบขึ้น และมีริบที่ขอบผิวหน้าแนวเชื่อมทางด้านแอดวานซ์ เพียงด้านเดียว (125 ถึง 200 มิลลิเมตร/นาทีก) และที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำกว่า 125 มิลลิเมตร/นาทีก (100 ถึง 50 มิลลิเมตร/นาทีก) ผิวหน้าแนวเชื่อมจะขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งมีผลมาจากตัวแปรในการเชื่อม คือ ความเร็วในการเดินเชื่อม ขนาดของบ่าเครื่องมือเชื่อม มุมเอียงของบ่าเครื่องมือเชื่อม รูปร่างของตัวกวน และการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ในขณะที่ทำการกวนที่รอยต่อทำให้เนื้อวัสดุเกิดความร้อน อยู่ในสภาวะพลาสติก บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม (50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาทีก) ไม่พบจุดบกพร่อง

4.6.2 ผลการทดสอบแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

ผลการทดสอบแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 4.34

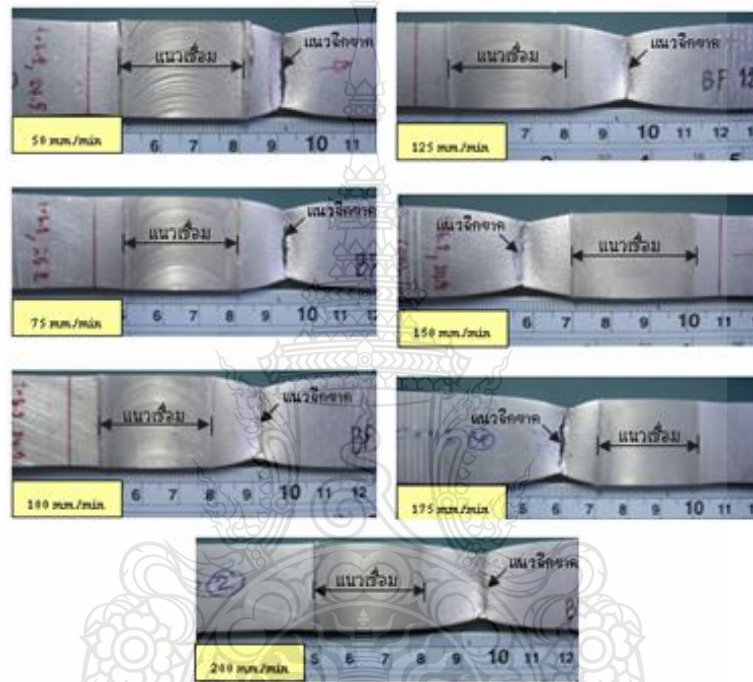


รูปที่ 4.34 ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับต่างๆ ของตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.34 พบว่า ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 150 มิลลิเมตร/นาทีก มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ 159.67 MPa และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาทีก มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด คือ 142.33 MPa ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 150 มิลลิเมตร/นาทีก มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด คือ 30.01 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตร/นาทีก มีค่าเฉลี่ย

ของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวดึงต่ำที่สุด คือ 22.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดสอบมีปรากฏการณ์ที่มีลักษณะคล้ายกับการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา เส้นสันเกลียวของการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา จะดันเนื้อวัสดุที่ถูกกวนไปในทิศทางที่ตรงข้ามกัน โดยให้ค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ของแนวเชื่อมที่ต่ำกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงค่าในรูปที่ 4.24 กับรูปที่ 4.34

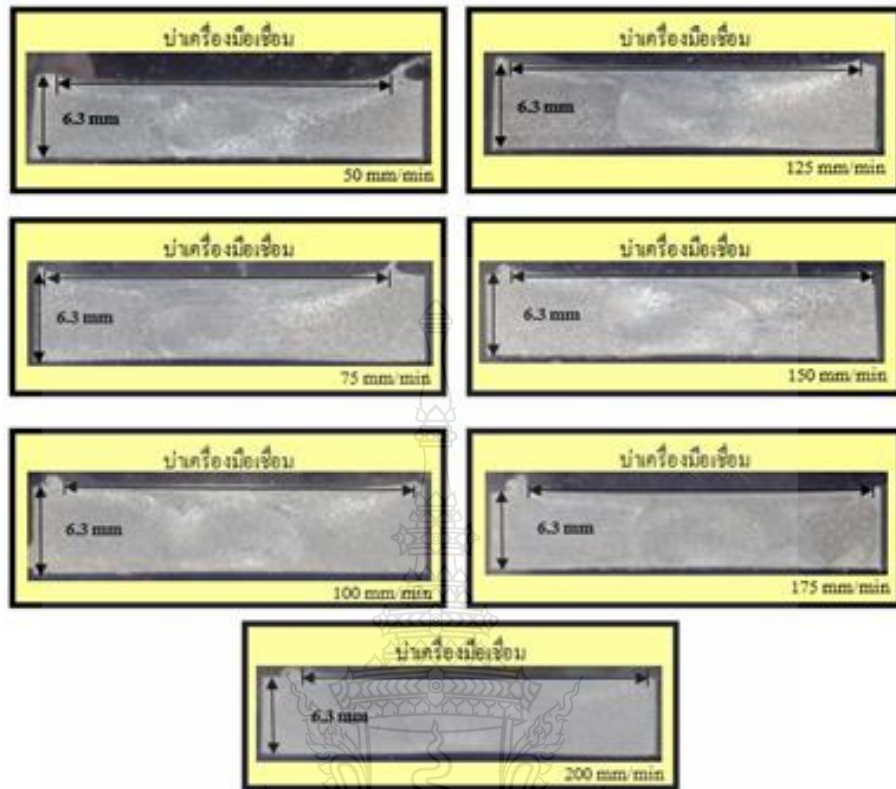
4.6.3 บริเวณการฉีกขาดหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.35 บริเวณจุดขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

จากรูปที่ 4.35 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นทดลองที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา หลังการทดสอบแรงดึงชิ้นงาน พบว่า ชิ้นทดสอบเกิดการฉีกขาดที่วัสดุหลักห่างจากขอบของแนวเชื่อมประมาณ 12 - 15 มิลลิเมตร การฉีกขาดที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม 50, 75, 100, 125 และ 200 มิลลิเมตร/นาที จะฉีกขาดด้านรีทริทึง ส่วนที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 150 และ 175 มิลลิเมตร/นาที จะฉีกขาดด้านแอดวานซึ่ง สาเหตุที่เกิดการฉีกขาดที่บริเวณดังกล่าวนี้เพราะวัสดุหลักได้รับความร้อนจากการเสียดทานระหว่างบ่าเครื่องมือเชื่อมกับผิวชิ้นงานตามทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการฉีกขาด และวัสดุหลักอาจมีจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุเอง สาเหตุที่ไม่เกิดการฉีกขาดที่แนวเชื่อมเพราะบริเวณแนวเชื่อมไม่เกิดจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ที่เป็นสาเหตุของการพังทลาย

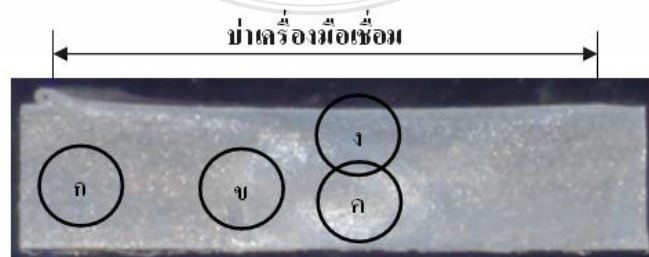
4.6.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



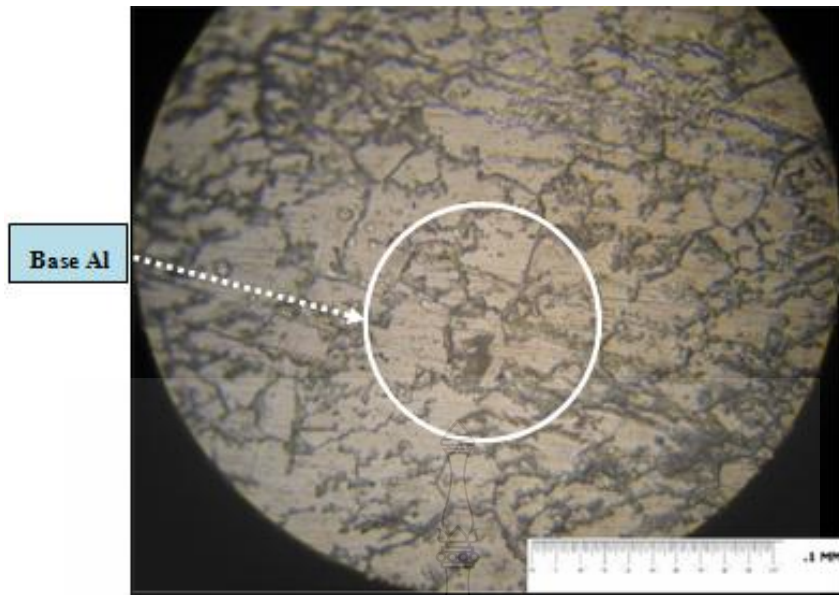
รูปที่ 4.36 โครงสร้างมหภาค ของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุน ทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

จากรูปที่ 4.36 จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา ไม่พบจุดบกพร่องในแนวเชื่อมเช่นกัน และการฉีกขาดของชิ้นทดสอบจะฉีกขาดที่วัสดุหลัก ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.35

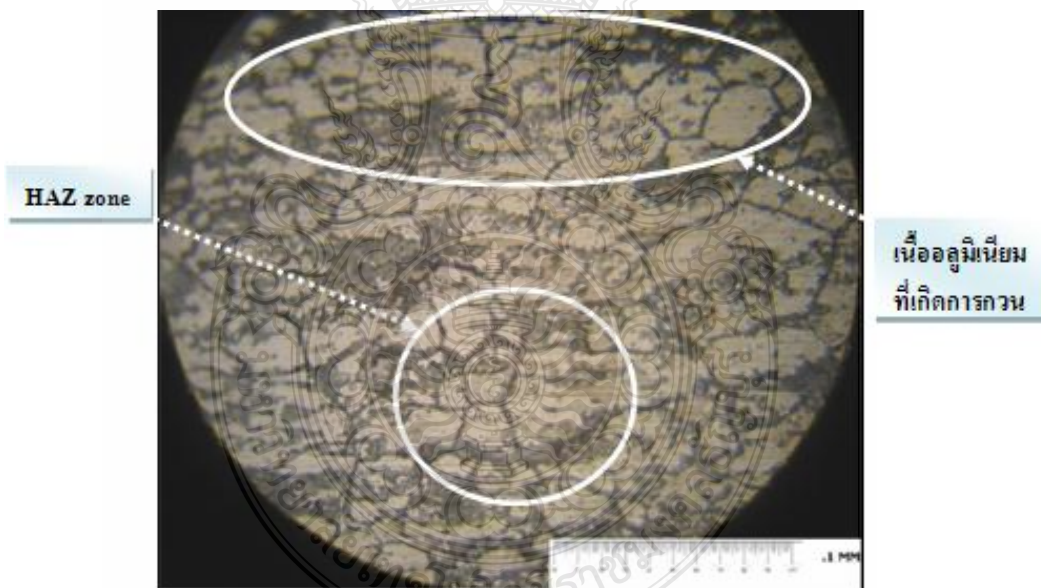
4.6.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



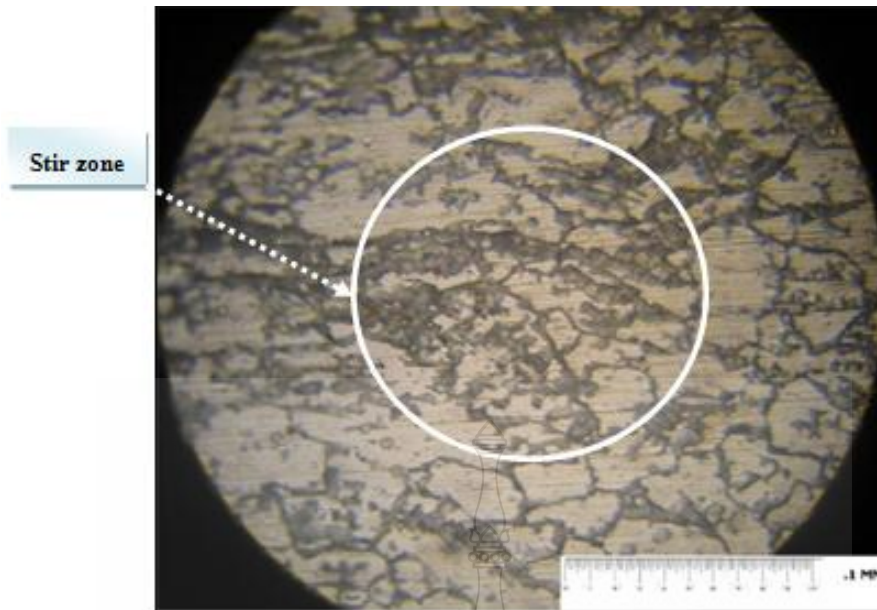
รูปที่ 4.37 พื้นที่ที่เกิดการกวนและพื้นที่ของอลูมิเนียมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



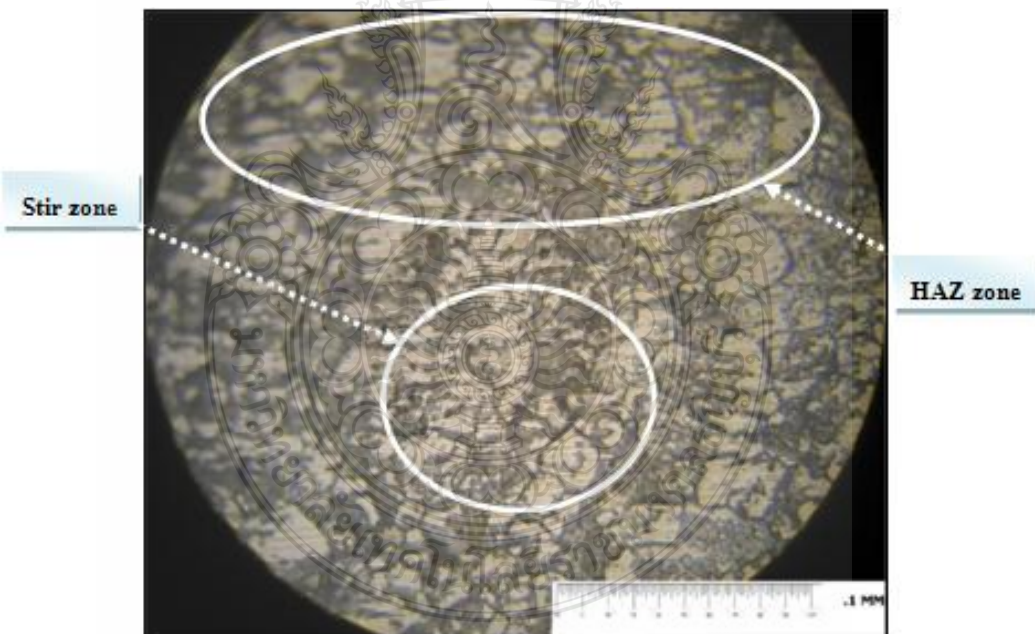
รูปที่ 4.38 พื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมเดิมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณ (ก)
(กำลังขยาย 600 เท่า)



รูปที่ 4.39 พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากการเชื่อมและพื้นที่การไหลของเนื้ออลูมิเนียม
ในบริเวณ (ข) (กำลังขยาย 600 เท่า)



รูปที่ 4.40 พื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมที่เกิดการกวนของเครื่องมือเชื่อม ในบริเวณ (ค)
(กำลังขยาย 600 เท่า)

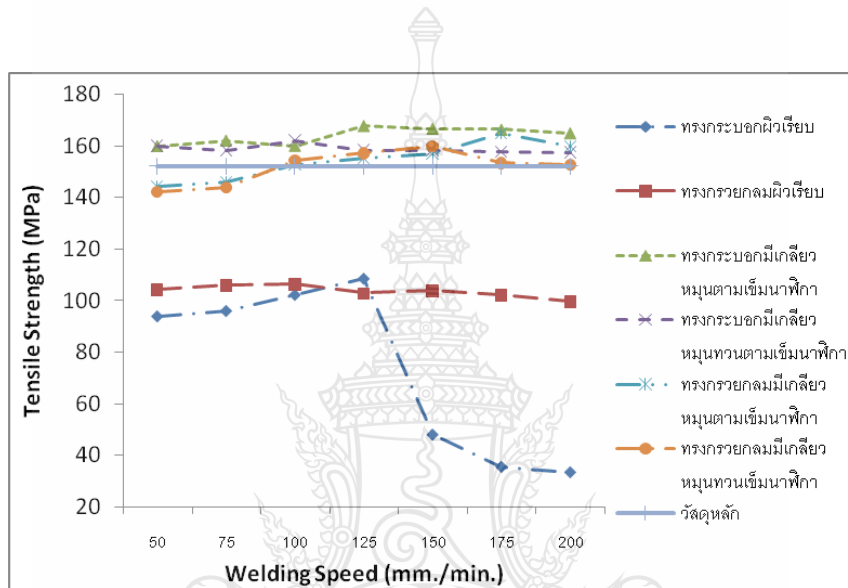


รูปที่ 4.41 พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อนในการเชื่อมและพื้นที่ของเนื้ออลูมิเนียมที่เกิดการกวน
ได้ป่าเครื่องมือเชื่อมในบริเวณ (ง) (กำลังขยาย 600 เท่า)

จากรูปที่ 4.38, 4.39, 4.40 และ 4.41 มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในแนวเชื่อม เหมือนกันกับการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา เนื่องจากตัวกวนที่มีทิศทางการหมุนแบบ หมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อเริ่มกวนเส้นส้นเกลียวจะดันเนื้อวัสดุหลักที่ถูก

กวน ไหลวนลงไปยังด้านล่างของแนวเชื่อม ซึ่งบริเวณแนวเชื่อมด้านล่างได้รับความร้อนจากปา เครื่องมือเชื่อมน้อยกว่าผิวหน้าแนวเชื่อมด้านบน เนื้อวัสดุหลักส่วนใหญ่จะถูกดันลงด้านล่างแนวเชื่อม และหมุนวนขึ้นไปด้านบน ซึ่งทำให้การรวมตัวของเนื้อวัสดุมีความสมบูรณ์น้อยกว่า จึงทำให้ภายในเนื้อแนวเชื่อมมีเม็ดเกรนใหญ่กว่า จึงทำให้ค่าความต้านแรงดึงและ เปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อยกว่า การเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา

4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของตัวกวนรูปร่างชนิดต่างๆ

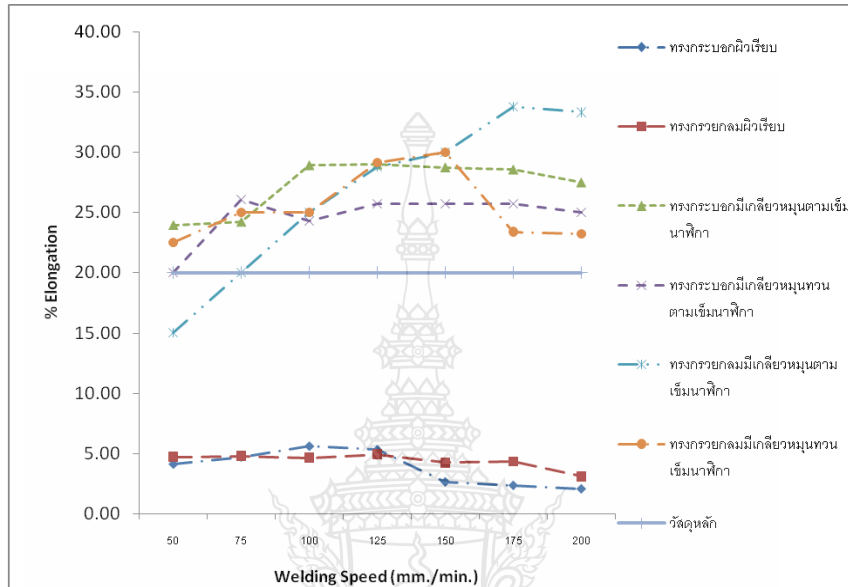


รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ ทุกสภาวะ ความเร็วในการเดินเชื่อม

จากรูปที่ 4.42 เห็นได้ว่าวัสดุหลักมีค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 152 MPa ในทุกรูปแบบของ ชนิดตัวกวน ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมไปจนถึง ระดับหนึ่ง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมให้สูงมากขึ้นไปอีก ก็พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง มี แนวโน้มลดลง อาจเป็นเพราะว่า ขณะทำการเชื่อมเนื้อวัสดุภายใต้ปาเครื่องมือเชื่อม และบริเวณรอบๆ ตัวกวนเกิดการไหลวน และเกิดการรวมตัวกันของเนื้อวัสดุ ซึ่งสภาวะการรวมตัวกันที่ เมื่อ เครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่ โดยมีความเร็วในการเดินเชื่อมสูงขึ้นทำให้การรวมตัวกันของเนื้อวัสดุช้ากว่า ความเร็วในการเดินเชื่อม จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันไม่สมบูรณ์ มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของ รอยเชื่อมลดลง ดังนั้น ในการเลือกเครื่องมือเชื่อมเพื่อที่จะนำไปใช้งานควรเลือกใช้ตัวกวนชนิดรูป ทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ทุกระดับความเร็วในการเดินเชื่อม และควรเลือกใช้ ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ระดับความเร็วในการเดินเชื่อม 100

มิลลิเมตร/นาที จนถึง 200 มิลลิเมตร/นาที เพราะว่ามีค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุหลัก

4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของตัวกวนรูปร่างชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ ทุกสภาวะ ความเร็วในการเดินเชื่อม

จากรูปที่ 4.43 เห็นได้ว่าวัสดุหลักมีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในทุกรูปแบบของชนิดตัวกวน ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมไปจนถึงระดับหนึ่ง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมให้สูงมากขึ้นไปอีก ก็พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว มีแนวโน้มลดลง อาจเป็นเพราะว่า การรวมกันของเนื้อวัสดุ เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมสูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างภายในของเนื้อวัสดุที่ถูกกวนให้มีขนาดของเม็ดเกรนขยายใหญ่ และหยาบขึ้น จากการเคลื่อนที่ของตัวกวนที่เพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมขนาดของเกรนที่หยาบมีผลทำให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมต่ำลง และค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวต่ำลงด้วย ดังนั้น ในการเลือกเครื่องมือเชื่อมเพื่อที่จะนำไปใช้งานควรเลือกใช้ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ทุกระดับความเร็วในการเดินเชื่อม และควรเลือกใช้ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ระดับความเร็วในการเดินเชื่อม 75 มิลลิเมตร/นาที จนถึง 200 มิลลิเมตร/นาที เพราะว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของแนวเชื่อม ที่สูงกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของวัสดุหลัก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ในการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมผสม AA 6063 – T1 ความหนา 6.3 มิลลิเมตร โดยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนของตัวกวนชนิดต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที โดยบ่าเครื่องเชื่อม (Shoulder) ทำมุมเอียงในแนวตั้ง 2 องศา กับชิ้นงานทดลองเชื่อมที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200 มิลลิเมตร/นาที ในการเชื่อมต่อชน ทาราบ และการเปรียบเทียบระหว่างตัวกวนชนิดต่างๆ เมื่อนำผลทดสอบการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนของตัวกวนชนิดต่างๆ ที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ โดยใช้ค่าสูงสุด

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบและการวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบ จากการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา พบว่า เมื่อใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมมากกว่า 125 มิลลิเมตร/นาที ทำให้เกิดจุดบกพร่องที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม และจุดบกพร่องมีแนวโน้ม กว้างขึ้นเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับเนื้อวัสดุของการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกผิวเรียบไม่สัมพันธ์กับความเร็วในการเดินเชื่อม จุดบกพร่องนี้เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคบริเวณด้านล่างแนวเชื่อม พบช่องว่างด้วยเช่นกัน ซึ่งมีผลทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการพังทลาย หรือฉีกขาดที่บริเวณแนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม โดยที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 108.33 MPa และที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 5.59 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 ตัวกวนชนิดรูปกรวยผิวเรียบ จากการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา พบว่า ที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่อง เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคบริเวณด้านล่างแนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ปรากฏช่องว่างที่เป็นจุดบกพร่องของแนวเชื่อม เนื่องจากความร้อนและการไหลวนระหว่างผิวของตัวกวนกับเนื้อวัสดุภายใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม และส่วนปลายของตัวกวนที่มีลักษณะเรียวยาวทำให้ได้รับความร้อนจากแรงเสียดทานน้อยกว่าบริเวณอื่น จึงเป็นสาเหตุการเกิดจุดบกพร่องตรงส่วนปลายตัวกวนในขณะเชื่อม ซึ่งมีผลทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการพังทลาย หรือฉีกขาดที่บริเวณแนวเชื่อมทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 106.25 MPa และที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 4.92 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา จากการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา พบว่า ที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่อง เมื่อทำการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคที่ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่องเช่นกัน เนื่องจากรูปร่างของตัวกวนเป็นตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว ทำให้เนื้อวัสดุที่ถูกกวนได้รับความร้อนจากแรงเสียดทานจากบ่าเครื่องมือเชื่อม และตัวกวนเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการรวมตัวได้ดี จากทิศทางการหมุนยังทำให้เนื้อวัสดุบริเวณรอบๆ ตัวกวนถูกดึง และไหลวนขึ้นมาตามร่องเกลียวจนชนกับบ่าเครื่องมือเชื่อม เมื่อเนื้อวัสดุได้รับแรงกด และแรงอัดจากบ่าเครื่องมือเชื่อมทำให้ไหลวนกลับลงไปที่ด้านล่างของแนวเชื่อมจึงทำให้เนื้อวัสดุรวมตัวกัน ได้สมบูรณ์จึงไม่เกิดจุดบกพร่อง ซึ่งมีผลทำให้แนวเชื่อมเกิดความแข็งแรงมากกว่าวัสดุหลัก เมื่อดูจากตำแหน่งการนิกาขาคของแนวเชื่อม โดยที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 167.86 MPa และมีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 29.00 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา จากการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา พบว่า ที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม พบจุดบกพร่องเล็กๆ เมื่อทำการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคที่ความเร็วในการเดินเชื่อมที่สูงกว่า 50 มิลลิเมตร/นาที ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม พบจุดบกพร่องทุกสภาวะ เนื่องจากตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นทิศทางการไหลวนของเนื้อวัสดุที่ถูกกวนจึงมีทิศตรงข้ามกัน ทำให้บริเวณที่ส่วนปลายของตัวกวนเกิดจุดบกพร่องเล็กน้อย ซึ่งจุดบกพร่องนี้ยังไม่ทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุหลักเมื่อดูจากตำแหน่งการนิกาขาคของแนวเชื่อม โดยที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 162.08 MPa และที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 75 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 26.07 เปอร์เซ็นต์

5.1.5 ตัวกวนชนิดรูปทรงกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา จากการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา พบว่า ที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่อง เมื่อทำการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคที่ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่องเช่นกัน เนื่องจากรูปร่างของตัวกวนเป็นตัวกวนชนิดรูปทรงกรวยกลมแบบมีเกลียว ความร้อนที่เนื้อวัสดุได้รับจากการหมุน และการเคลื่อนที่ในการเชื่อมจากเครื่องมือเชื่อมจึงน้อยกว่า ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว เมื่อดูจากตำแหน่งการนิกาขาค แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุหลัก โดยที่สภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม 175 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 165.00 MPa และมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 33.75 เปอร์เซ็นต์

5.1.6 ตัวกวนชนิดรูปทรงกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา จากการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตา พบว่า ที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่อง เมื่อทำการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคที่ทุกสภาวะความเร็วในการเดินเชื่อม ไม่พบจุดบกพร่องเช่นกัน ค่าความแข็งแรงดึงของแนว

เชื่อมมีค่าน้อยกว่า การเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงวงกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา เนื่องจากทิศทางการหมุน เมื่อดูจากตำแหน่งการฉีกขาด แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุหลัก โดยที่สถานะความเร็วในการเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด คือ 159.67 MPa และมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 30.01 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น จากการทดสอบและวิเคราะห์ผล สรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา และตัวกวนชนิดรูปทรงวงกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา มีความเหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากค่าตัวแปร ทั้งสองตัวแปรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุหลัก ในขณะที่ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน เมื่อพิจารณาถึง ค่าความเร็วในการเดินเชื่อม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและตัวกวนชนิดรูปทรงวงกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ ของการทดลองโดยใช้สถิติ
- 5.2.2 ควรมีการทดลองเชื่อมด้วยวัสดุที่หลากหลายหรือเชื่อมด้วยวัสดุต่างชนิดกัน
- 5.2.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของ โครงสร้างจุลภาคในกรณีที่เกิดการฉีกขาดหรือการพังทลายในบริเวณแนวเชื่อม และบริเวณเนื้อวัสดุหลัก ของแต่ละสถานะความเร็วในการเดินเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ
- 5.2.4 ควรมีการศึกษาผลกระทบร้อนที่มีผลต่อการฉีกขาด และการพังทลายของวัสดุหลัก ทั้งทางด้านแอดวานซ์ และด้านรีทริทิง ว่ามีอิทธิพลต่อการฉีกขาดที่เนื้อวัสดุหลักอย่างไร
- 5.2.5 ควรมีการศึกษาขนาดของปาเครื่องมือเชื่อมว่ามีอิทธิพลต่อการกดอัด บนบริเวณผิวหน้าแนวเชื่อมและส่งผลกระทบต่อารรวมตัวของเนื้อวัสดุในแนวเชื่อมอย่างไร

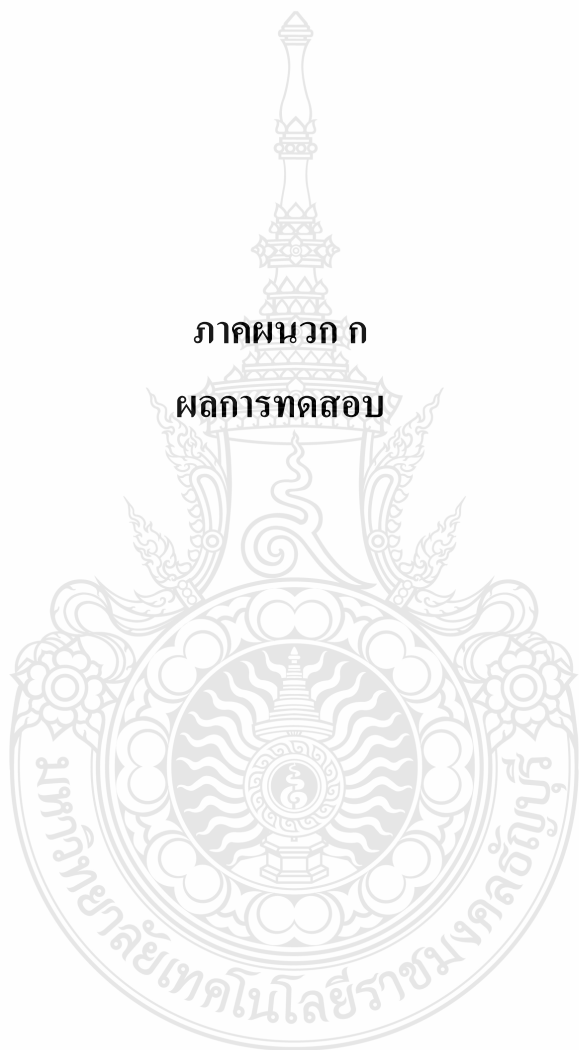
เอกสารอ้างอิง

- [1] Thomas, W.M., et al. "Friction Stir Welding," **B. Patent Application No. 9125978.8**, 1991.
- [2] Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. "Friction Stir Welding for the Transportation Industries," **Materials and Design**, Vol 18, 1997. pp 269-273.
- [3] Lie, H.J., et al. "Tensile Properties and Fracture Locations of Friction Stir Welding Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy," **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 142, 2003. pp 692-696.
- [4] Peel, M., et al. "Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminum AA5083 Friction Stir Welds," **Acta Materialia**, Vol 51, 2003. pp 4791-4801.
- [5] Ericsson, E. and Sandstrom, A. (2003). "Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds and Comparison with MIG and TIG," **Journal of Fatigue**, Vol 25, 2003. pp 1379-1387.
- [6] Jata, K.V. and Semiatin, S.L. "Continuous Dynamic Recrystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys," **Scripta Mater**, Vol 43, 2000. pp 743-749.
- [7] วิถีพีเดีย สารานุกรมเสรี, การเชื่อมโลหะ (ออนไลน์), 2551. เข้าถึงได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/> (18 ตุลาคม 2551).
- [8] อนันต์ พรหมสิทธิบุตร, การพัฒนาเทคนิคการเชื่อมแบบแรงเสียดทานสำหรับเชื่อมต่อโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร, สาขาวิชาวัสดุศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546. หน้า บทคัดย่อ.
- [9] เขก ทองอุ่น, "กระบวนการเชื่อมโลหะ," ใน คู่มือการเชื่อมโลหะของโซบาร์ท, บรรณาธิการ โดย หน้า 180-182. กรุงเทพฯ: วิทยาลัยครูอาชีวศึกษา, 2513.
- [10] ตะวันรุ่ง รัตนอุไร, งานเชื่อมและโลหะแผ่นเบื้องต้น. (ออนไลน์), 2551. เข้าถึงได้จาก: <http://www.thesped.th.gs/web-t/hesped/Data/2> (20 ตุลาคม 2551).
- [11] A.R.D. Industries Ltd, **Principles of friction welding**, (Online). (2000.). Available: <http://www.ardindustries.com/HOME-3.html> (10 October 2008).
- [12] Threadgill, Philip, **TWI Knowledge Summary Linear friction welding** (Online). (n.d.). Available: <http://images.google.co.th/images?hl=th&q=Linear+Friction+welding&btnG> (18 October 2008).
- [13] Wikipedia The Free Encyclopedia, **Friction stir welding** (Online). (n.d.). Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding (18 October 2008).

- [14] ประมุข เข้มบุญชู. **งานเชื่อมและงานโลหะแผ่น**. กรุงเทพฯ: เอ็มพันธ์ จำกัด, 2543.
- [15] มนัส สติรจินดา, “สมบัติทั่วไปของโลหะอลูมิเนียม,” ใน **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก**, กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2538. หน้า 1-16.
- [16] Saunders, H.L., **Welding Aluminum : Theory and Practice**, 2nd ed., (n.p.), 1991. pp. 2-3.
- [17] แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา, **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ที่อุป จำกัด, 2545. หน้า 342-352.
- [18] **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก**. (ออนไลน์), 2551. เข้าถึงได้จาก: <http://www.gprecision.net/metallurgy-Nonferrous-Metals.html> (18 ตุลาคม 2551).
- [19] เชิดเชหลง ชิตชวนกิจ และคณะ, **วิศวกรรมการเชื่อม**, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, กรุงเทพฯ, 2524. หน้า 123-130.
- [20] อนุชา ขวัญสุข, **เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอลูมิเนียมเจือ AA6063 - T1**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- [21] Smith, William F, **Structure and Properties of Engineering Alloys**, NewYork: McGraw-Hill, 1981.
- [22] สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์, **โลหะวิทยา**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541. หน้า 129-138.
- [23] วัลลภ วุฒิศรสถล, อุมารินทร์ พงศ์โสภิตานันท์และธนภรณ์ โกรายภูร์, **การศึกษาและวิเคราะห์โลหะจากภาพ**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2537. หน้า 21-48.
- [24] สมศักดิ์ ศรีป่าหมาก และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์. “อิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อมต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน,” **การประชุมสัมมนาทางวิชาการ “ราชชมงคลอีสานวิชาการ,”** ครั้งที่ 1, 9-13 มกราคม 2552, ณ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา, 2552. หน้า 35.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบ



จากผลการทดสอบ และคำนวณ ได้ค่าทดสอบ ดังนี้

ตารางที่ ก. 1 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	ค่าความแข็งแรงดึงรูปกรวยกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา			ค่าเฉลี่ย (MPa)
	ชั้นทดลองที่ 2	ชั้นทดลองที่ 3	ชั้นทดลองที่ 4	
50	143	140	150	144.33
75	144	145	149	146.00
100	153	151	154	152.67
125	157	155	154	155.33
150	158	155	158	157.00
175	161	167	167	165.00
200	159	159	162	160.00

ตารางที่ ก. 2 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	ค่าความยาวที่เพิ่มขึ้น			ค่าเฉลี่ย (KN)	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว
	ชั้นทดลองที่ 2	ชั้นทดลอง 3	ชั้นทดลอง 4		
50	6.00	8.00	4.00	6.00	15.00
75	9.00	8.00	7.00	8.00	20.00
100	8.75	11.50	9.75	10.00	25.00
125	10.75	12.50	11.25	11.50	28.75
150	11.75	12.50	11.75	12.00	30.00
175	12.60	13.95	13.95	13.50	33.75
200	13.15	13.15	13.65	13.32	33.29

ตารางที่ ก. 3 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาทึ	ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา	
	ค่าความแข็งแรงดึง (KN)	% การยืดตัว
50	144.33	15.00
75	146.00	20.00
100	152.67	25.00
125	155.33	28.75
150	157.00	30.00
175	165.00	33.75
200	160.00	33.29

ตารางที่ ก. 4 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวกับชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาทึ	ค่าความแข็งแรงดึง(KN)	
	ตัวกวนรูปกรวยกลม	ตัวกวนรูปทรงกระบอก
50	144.33	160.00
75	146.00	162.14
100	152.67	160.71
125	155.33	167.86
150	157.00	166.79
175	165.00	166.43
200	160.00	165.00

ตารางที่ ก. 5 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวกับ ชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว	
	ตัวกวนรูปกรวยกลม	ตัวกวนรูปทรงกระบอก
50	15.00	23.93
75	20.00	24.20
100	25.00	28.93
125	28.75	29.00
150	30.00	28.75
175	33.75	28.57
200	34.99	27.50

ตารางที่ ก. 6 แสดงข้อมูลค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา	
	ค่าความแข็งแรงดึง(KN)	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว
50	160.00	23.93
75	162.14	24.20
100	160.71	28.93
125	167.86	29.00
150	166.79	28.75
175	166.43	28.57
200	165.00	27.50

ตารางที่ ก. 7 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	ค่าความแข็งแรงดึงรูปกรวยกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา			ค่าเฉลี่ย(MPa)
	ชั้นทดลองที่ 2	ชั้นทดลองที่ 3	ชั้นทดลองที่ 4	
50	142	144	141	142.33
75	142	144	146	144.00
100	156	152	155	154.33
125	157	155	159	157.00
150	162	158	159	159.67
175	154	154	152	153.33
200	152	154	152	152.67

ตารางที่ ก. 8 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063 –T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ ของชั้นทดสอบ ที่ 2, 3 และ 4

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	ค่าความยาวที่เพิ่มขึ้น			ค่าเฉลี่ย (KN)	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว
	ชั้นทดลองที่ 2	ชั้นทดลองที่ 3	ชั้นทดลองที่ 4		
50	8.75	10.50	7.75	9.00	22.50
75	11.20	9.45	9.35	10.00	25.00
100	9.35	11.10	9.55	10.00	25.00
125	11.85	11.60	11.55	11.67	29.17
150	11.75	12.30	11.96	12.00	30.01
175	9.45	9.26	9.35	9.35	23.38
200	9.27	9.24	9.32	9.28	23.19

ตารางที่ ก. 9 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063-T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาทึ	ตัวกวนชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา	
	ค่าความแข็งแรงดึง(KN)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
50	142.33	22.50
75	144.00	25.00
100	154.33	25.00
125	157.00	29.17
150	159.67	30.01
175	153.33	23.38
200	152.67	23.19

ตารางที่ ก. 10 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียวกับชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาทึ	ค่าความแข็งแรงดึง(KN)	
	ตัวกวนรูปกรวยกลม	ตัวกวนรูปทรงกระบอก
50	144.67	160.00
75	143.33	158.47
100	154.33	162.08
125	157.00	158.33
150	159.00	158.33
175	150.00	157.78
200	160.67	157.50

ตารางที่ ก. 11 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ระหว่างตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว กับชนิดรูปกรวยกลมแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	% การยึดตัว	
	ตัวกวนรูปกรวยกลม	ตัวกวนรูปทรงกระบอก
50	22.50	20.00
75	25.00	26.07
100	25.00	24.29
125	30.00	25.71
150	22.50	25.71
175	18.75	25.57
200	31.25	25.00

ตารางที่ ก. 12 ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของอลูมิเนียมผสม AA6063 – T1 ในการเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่างๆ

ความเร็วในการเชื่อม มม./นาที	ตัวกวนชนิดรูปทรงกระบอกแบบมีเกลียว หมุนทวนเข็มนาฬิกา	
	ค่าความแข็งแรงดึง(KN)	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว
50	160.00	20.00
75	158.47	26.07
100	162.08	24.29
125	158.33	25.71
150	158.33	25.71
175	157.78	25.57
200	157.50	25.00



ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์



บทความงานวิจัย

ราชมงคลอีสานวิชาการ ครั้งที่ 1



สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

อิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อมต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1
ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

Friction Stir Welding Speed affecting Tensile Strength of AA6063-T1 Aluminum Alloy Butt Joint

นักวิจัย	สมศักดิ์ ศรีป่าหมาก และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์
หน่วยงาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กลุ่มงาน	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 และทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-225 มม./นาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงและโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่า 106 MPa เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที การเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความเร็วรอบที่สูงเกินไปทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้าและโครงสร้างจุลภาคขนาดใหญ่ จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดความแข็งแรงดึง

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน; รอยต่อชน; อลูมิเนียมผสม; ความเร็วเดินแนวเชื่อม

Abstract

This paper proposes an application of a Friction Stir Welding (FSW) to butt weld AA6063-T1 aluminum alloy. The welding parameters that affect the joint properties such as a welding speed of 50-225 mm/min were studied. The results showed that a variation of the welding speed gave various tensile strengths and macrostructures. The optimum tensile strength of 106 MPa could obtain when the butt joint was produced by a rotating speed of 2000 rpm and a welding speed of 125 mm/min. An increase of welding speed increased directly a joint tensile strength but when the welding speed was too high, the large defect could be observed on the bead surface and a macrostructure. The defect in the joint deteriorated directly the joint tensile strength.

Keywords: friction stir welding; butt joint; aluminum alloy; welding speed.

อิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อมต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1
ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

Friction Stir Welding Speed affecting Tensile Strength of AA6063-T1 Aluminum
Alloy Butt Joint

สมศักดิ์ ศรีป่าหมาก และกิตติพงษ์ กิมะพงษ์

กลุ่มพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 และทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-225 มม./นาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงและโครงสร้างมหภาคที่แตกต่างกัน ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่า 106 MPa เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที การเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความเร็วรอบที่สูงเกินไปทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้าและโครงสร้างจุลภาคขนาดใหญ่ จุดบกพร่องที่เกิดในแนวเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดความแข็งแรงดึง

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน; รอยต่อชน; อลูมิเนียมผสม; ความเร็วเดินแนวเชื่อม;

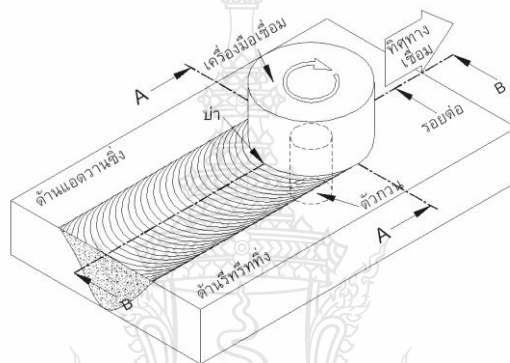
Abstract

This paper proposes an application of a Friction Stir Welding (FSW) to butt weld AA6063-T1 aluminum alloy. The welding parameters that affect the joint properties such as a welding speed of 50-225 mm/min were studied. The results showed that a variation of the welding speed gave various tensile strengths and macrostructures. The optimum tensile strength of 106 MPa could obtain when the butt joint was produced by a rotating speed of 2000 rpm and a welding speed of 125 mm/min. An increase of welding speed increased directly a joint tensile strength but when the welding speed was too high, the large defect could be observed on the bead surface and a macrostructure. The defect in the joint deteriorated directly the joint tensile strength.

Keyword: friction stir welding; butt joint; aluminum alloy; welding speed;

บทนำ

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) เช่น อลูมิเนียมผสม (Thomas *et al.*, 1991) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย FSW สามารถทำให้กลสมบัติของแนวเชื่อมมีค่าสูงในบริเวณแนวเชื่อม (Welded Zone) กระบวนการ FSW นี้ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร (Thomas and Nicolas, 1991) และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงไว้ในรูปที่ 1

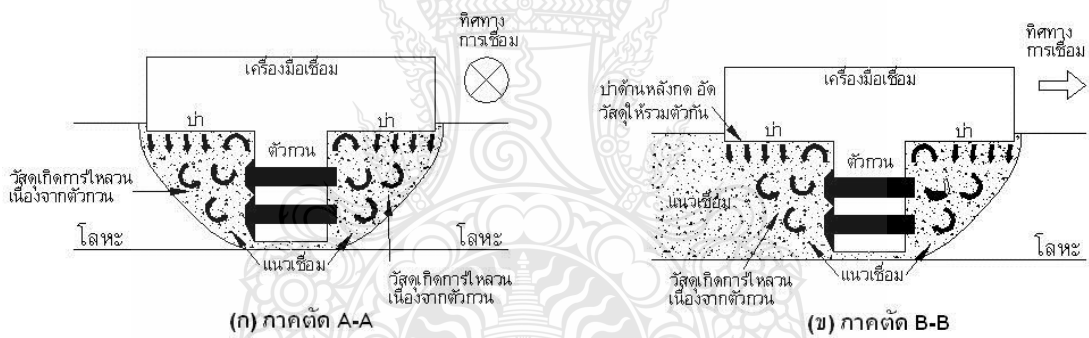


รูปที่ 1: การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

ตัวกวน (Probe or Stirrer) ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อม (Rotating Tool) สอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือ เชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสถานะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงภาคตัด A-A และ B-B ในรูปที่ 1 วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดขยอนลงมาเนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้น ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ผู้คิดค้นกำหนดชื่อกระบวนการว่า “Friction Stir Welding” อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายในบทความนี้เป็นเบื้องต้น ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมาสู่ด้านหลังตามทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทาร์ท และบางส่วนจะไหลจากด้านหลังสู่ด้านหน้าทางด้านแอดวานซ์ซึ่งดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 (ด้านรีทาร์ททั้ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซ์ คือ ด้านที่ทิศทางการ

หมุนของตัวถวนขนานกับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวถวนและตัวถวนเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม จะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 (ข)

ที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ FSW ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรดต่างๆมากมาย เช่น การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียมผสม A356 (Lee *et al.*, 2003), อลูมิเนียมเกรด AA2014-T351 (Liu *et al.*, 2003), อลูมิเนียมเกรด AA5083 (Peel *et al.*, 2003), อลูมิเนียมเกรด AA6082 (Ericsson and Sandstrom, 2003), อลูมิเนียมผสม Al-Li-Cu (Java and Semiatin, 2000) เป็นต้น และการศึกษาเหล่านี้ได้รายงานความแข็งแรงของรอยต่อชนเหล่านี้มีค่าสูงมากกว่าอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในงานเชื่อม อย่างไรก็ตามในกรณีอลูมิเนียมเกรด 6063-T1 ซึ่งเป็นอลูมิเนียมที่สามารถผลิตและใช้งานในประเทศไทยนั้นไม่ได้มีรายงานไว้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบถวนในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรดนี้ โดยเบื้องต้นทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมและเปรียบเทียบกับโครงสร้างมหภาคของรอยต่อ

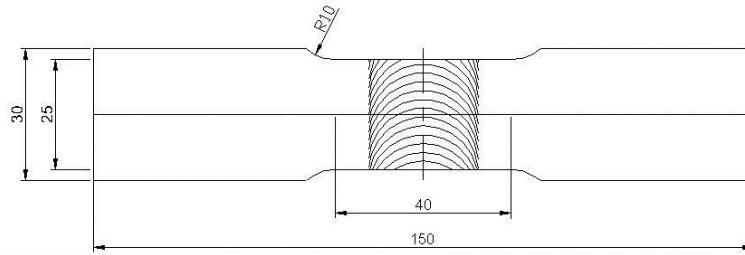


รูปที่ 2 กลไกการเกิดแนวเชื่อม

วิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 (94.7%Al-0.4%Mg-0.05%Mn-0.01%Cr-0.02%Cu โดยน้ำหนัก) ที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณ 210 MPa เมื่อทำการทดสอบดึงตามแนวรีด แผ่นอลูมิเนียมถูกเตรียมให้มีขนาดยาว 140 มม. และกว้าง 75 มม. แผ่นวัสดุถูกนำมาประกอบเป็นรอยต่อชนดังแสดงในรูปที่ 1 และยึดแน่นบนแท่นเครื่องกัด เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของบ่าเครื่องมือมีค่าเท่ากับ 25 มม. ตัวถวนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 6 มม. ความยาวตัวถวนมีค่าเท่ากับ 6.1 มม. ความเร็วรอบของตัวถวนมีค่า 2000 รอบต่อนาที ความเร็วของการเดินแนวเชื่อมไปตามแนวต่อชนมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 50 75 100 125 150 175 และ 200 มม./นาที เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ชิ้นงานเชื่อมถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน AWS D1.2 ดังแสดงใน

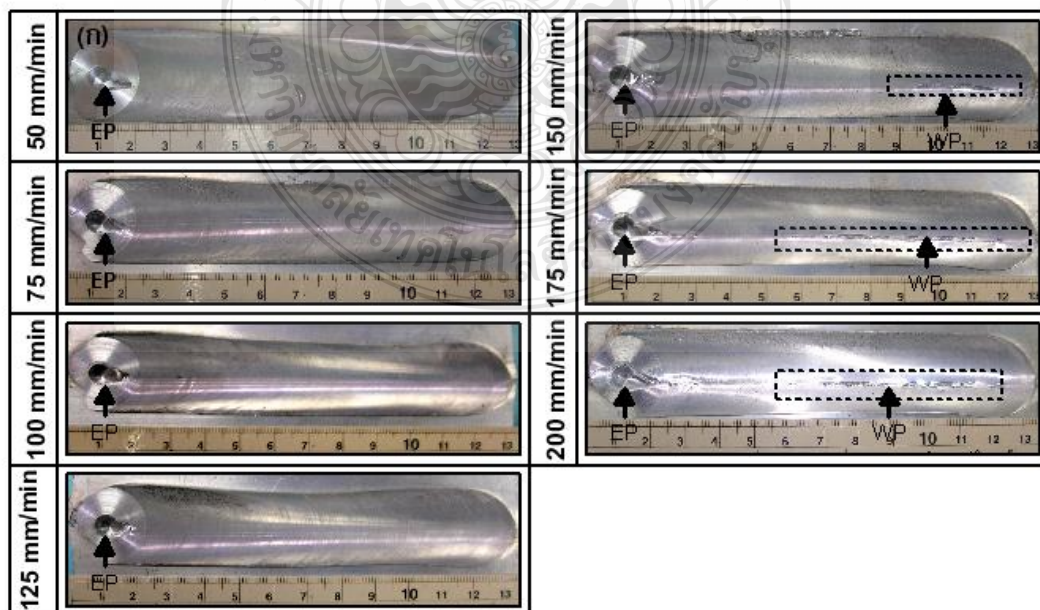
รูปที่ 3 รอยเชื่อมบริเวณกึ่งกลางตามแนวยาวถูกเตรียมสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม



รูปที่ 3 ชั้นทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย: มม.)

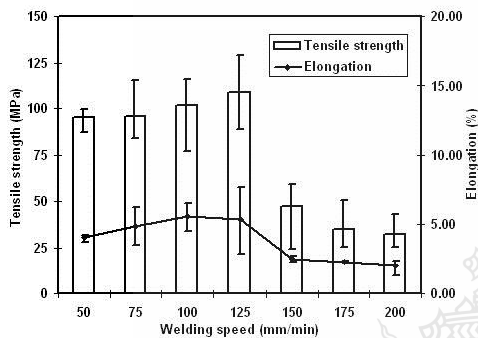
ผลการทดลองและการอภิปราย

รูปที่ 4 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเร็วรอบของตัวกวน 2000 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ พบว่าที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อมทุกๆสภาวะปรากฏจุดบกพร่องเป็นรูกลมขึ้นดังแสดงด้วยอักษร EP จุดบกพร่องนี้จะเกิดที่ทุกๆ สภาวะของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดไม่สามารถกำจัดออกได้ แต่สามารถที่จะอุดรูช่องว่างนี้ได้ด้วยกระบวนการเชื่อมต่างๆ ต่อไป (Mishra and Ma, 2005) ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำกว่า 125 มม./นาที่ แนวเชื่อมแสดงความสมบูรณ์ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุด ไม่ปรากฏจุดบกพร่องเกิดขึ้นบนผิวหน้าแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เช่น 150 ถึง 200 มม./นาที่ พบว่ามีความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นดังแสดงในพื้นที่สี่เหลี่ยมเส้นประรูปที่ 4 ความไม่สมบูรณ์นี้มีความโตและความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 200 มม./นาที่ อย่างไรก็ตามชิ้นงานเหล่านี้สามารถทำการเตรียมชั้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน AWS D1.2 ได้

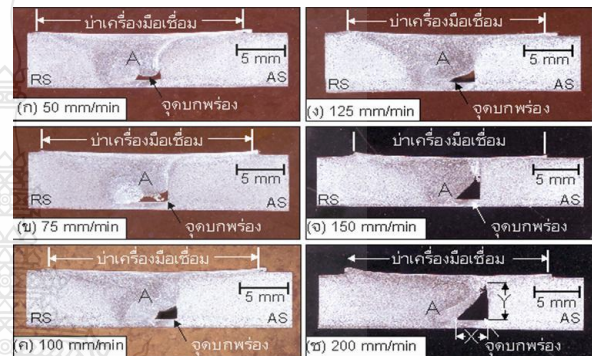


รูปที่ 4: ผิวหน้าแนวเชื่อมที่ค่าความเร็วรอบต่างๆ (หน่วยสเกล: มม.)

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยึดตัว และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่า ความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 125 มม./นาที นอกจากนั้นผลการทดสอบได้แสดงค่าร้อยละการยึดตัวของชิ้นทดสอบมีการเพิ่มขึ้นด้วย ที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที นี้เป็นค่าที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ 110 MPa ในการศึกษาครั้งนี้ จากนั้นค่าความแข็งแรงดึงและค่าการยึดตัวของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมตามผลการทดสอบแรงดึงในรูปที่ 4 นั้น คาดว่าเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่ทำการศึกษา



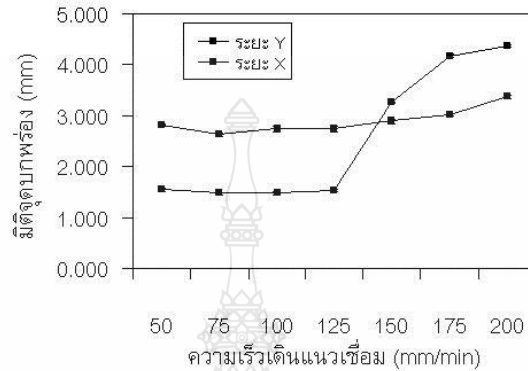
รูปที่ 5: ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยึดตัว และความเร็วเดินแนวเชื่อม



รูปที่ 6: โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ ลักษณะของโครงสร้างแสดงพื้นที่การกวนแทนด้วยอักษร A ซึ่งเกิดจากตัวกวนขณะที่ทำการหมุนวนและกวนให้อลูมิเนียมภายใต้บ่าเครื่องมือให้เกิดการผสมกันเป็นเนื้อโลหะเชื่อม โดยทั่วไปบริเวณพื้นที่นี้จะมีค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการก่อผลึกเกรนใหม่ (Dynamic Recrystallization) ของอลูมิเนียมขึ้น (Java and Semiatin, 2000) อย่างไรก็ตามการตรวจสอบการก่อผลึกเกรนใหม่นี้ไม่ได้รายงานไว้ในการศึกษาครั้งนี้ และจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงนี้ต่อไปในอนาคตที่บริเวณด้านข้างของพื้นที่การกวนพบว่าช่องว่างที่เกิดจากการเชื่อมไม่สมบูรณ์ขึ้น จุดบกพร่องนี้พบในทุกชิ้นงานที่เชื่อมด้วยตัวแปรทั้งหมดในการศึกษาครั้งนี้ และตำแหน่งการเกิดจะเกิดขึ้นที่ด้านข้างของตัวกวนด้านแอดวานซ์ จุดบกพร่องลักษณะนี้เกิดขึ้นลักษณะเดียวกันกับการเกิดในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียมเกรด 2025 (Li *et al.*, 1997) และรอยต่อชนอลูมิเนียมเกรด 6063-T6 (บรรเจิด และ สมนึก, 2550) ซึ่งเหตุผลการเกิดเนื่องจากการเอียงตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมมีค่าน้อยเกินไป ทำให้เกิดการกวนอลูมิเนียมในแนวเชื่อมน้อยไป และส่งผลทำให้อลูมิเนียมที่อ่อนตัวเนื่องจากการเสียดทานกับผิวของตัวกวนไม่สามารถเติมเต็มลงไปตำแหน่งดังกล่าวได้เพียงพอ (Li *et al.*, 1997) หากมีการเอียงตัวกวนเพิ่มมากขึ้น คาดว่าจะทำให้เกิดการกวนที่รุนแรงและเติมอลูมิเนียมลงไป ในตำแหน่งช่องว่างจุดบกพร่องได้ต่อไป (Kimapong and Watanabe, 2005) นอกจากนั้นจุดบกพร่องนี้

ยังส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าความแข็งแรงของรอยต่อโดยจุดบกพร่องที่มีขนาดที่วัดระยะ ความสูงและความกว้างดังระยะ Y และระยะ X ดังแสดงในรูปที่ 6 (ช) จะมีขนาดที่ลดลงเมื่อความเร็ว เดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 125 มม./นาที และมิตินี้มีค่าขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเร็วเดินแนว เชื่อมเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างมิติของช่องว่างจุดบกพร่องและความเร็วเดินแนวเชื่อม

สรุปผลการทดลอง

รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ถูกเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวนตัวกวนทรง กระบอก ที่ความเร็วรอบตัวกวน 2000 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-225 มม./นาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงและ โครงสร้างมหภาคที่แตกต่างกัน ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดพบได้เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ที่ค่าความแข็งแรงดึงประมาณ 106 MPa ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความเร็วรอบที่สูงเกินไปทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้าและ โครงสร้างจุลภาคขนาดใหญ่ จุดบกพร่องที่เกิดในแนวเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดความแข็งแรงดึง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชวลิต นุชวงษ์ ช่างเทคนิค กลุ่มการพัฒนาระบวนการผลิตวัสดุ (Materials Processing Development Group: MPDG) และอาจารย์บุญส่ง จงกลณี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับการสนับสนุนทางด้านเทคนิคในการเตรียมชิ้นทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

บรรเจิด ดอนเนตรงาม และสมนึก วัฒนศรียกูล. 2550. การเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมเสียดทานหมุนกวนอลูมิเนียมเกรด AA6063-T6 ระหว่างสลักแกนหมุนทรงกระบอกหัวตัดตรงกับหัวโค้ง. การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ 24-26 ตุลาคม 2550. ภูเก็ต.: 1-6. (In press).

Ericsson, E. and Sandstrom, A. (2003). "Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds and Comparison with MIG and TIG." *Journal of Fatigue*. 25: 1379-1387.

Jata, K.V. and Semiatin, S.L. (2000). "Continuous Dynamic Recrystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys." *Scripta Mater*. 43: 743-749.

Kimapong K. and Wanatabe T. (2005). "Effect of Welding Process Parameters on Mechanical Property of FSW Lap Joint between Aluminum Alloy and Steel." *Materials Trans*. 46: 2211-2217.

Li, Y., Murr, L.E. and McClure, J.C. (1999). "Flow Visualization and Residual Microstructure associated with the Friction-stir Welding of 2024 Aluminum and 6061 Aluminum." *Materials Science and Engineering A*. 271: 213-223.

Lie, H.J., Fujii, H., Maeda, M. and Nogi, K. (2003). "Tensile Properties and Fracture Locations of Friction Stir Welding Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy." *Journal of Materials Processing Technology*. 142: 692-696.

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

Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M. and Withers, P.J. (2003). "Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminum AA5083 Friction Stir Welds." *Acta Materialia*. 51: 4791-4801.

Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J. (1991). "Friction Stir Welding" G.B. Patent Application No. 9125978.8.

Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. (1997). "Friction Stir Welding for the Transportation Industries" *Materials and Design*. 18: 269-273.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสมศักดิ์ ศรีป่าหมาก
วัน เดือน ปีเกิด	10 มิถุนายน 2505
ที่อยู่	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหลวง อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ. 2548
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2540- ปัจจุบัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์	

สมศักดิ์ ศรีป่าหมาก และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, “อิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อมต่อสมบัติของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน,” การประชุมวิชาการราชมงคลอีสานวิชาการ, ครั้งที่ 1, 9-11 มกราคม 2551, นครราชสีมา, 2551, หน้า 35.

