



การตรวจหารอยบกพร่องในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อทิ้งของแข็งโดยกรรมวิธี  
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6  
**Defect Inspection in Friction Stir Weld of SSM Cast 356 Aluminium Alloys  
with T6 Heat Treatment**

วรพงศ์ บุญช่วยแทน  
**Worapong Boonchouytan**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Industrial and System Engineering  
Prince of Songkla University**

**2554**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การตรวจหารอยบกพร่องในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อทิ้งของแข็ง โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6

**ผู้เขียน** นายรพงศ์ บุญช่วยแทน

**สาขาวิชา** วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

| <b>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก</b>                  | <b>คณะกรรมการสอบ</b>   |
|---|--|
| .....<br>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล)          | .....ประธานกรรมการ<br>(รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโถม)             |
| <b>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม</b>                  | ..... กรรมการ<br>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)         |
| .....<br>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี) | .....กรรมการ<br>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล)          |
|   | .....กรรมการ<br>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี) |
|   | .....กรรมการ<br>(ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)                             |

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



|                 |   |
|-----------------|---|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การตรวจหารอยบกพร่องในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อทิ้งของแข็ง โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6 |
| ผู้เขียน        | นายรพงศ์ บุญช่วยแทน   |
| สาขาวิชา        | วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ  |
| ปีการศึกษา      | 2553  |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการเชื่อมแบบต่อชนอะลูมิเนียมหล่อทิ้งแข็ง SSM 356 (Semi-Solid Metal 356) ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ในสภาวะทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (T6) โดยทำการเชื่อมที่ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding Speed) 160 mm/min มุมเอียงของ Tool 3 องศา และใช้หัวพิน (Pin) แบบทรงกระบอก (Straight Cylindrical) โดยมีปัจจัยในการเชื่อมคือ ความเร็วรอบการหมุนของ Tool (Rotation Speed) ที่ใช้ 1320, 1750 rpm และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่กำหนดคือ (1) As welded (AW) joints, (2) T6 Weld (TW) joints, (3) Weld T6 (WT) joints และ (4) T6 Weld T6 (TWT) joints และใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้วิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสตรวจสอบแนวเชื่อมเทียบกับการเอ็กซ์เรย์ ความเร็วรอบและสภาวะทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (T6) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ โครงสร้างทางมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม การเพิ่มความเร็วยรอบของตัวกวนและสภาวะทางความร้อนที่แตกต่างกันส่งผลถึงความแตกต่างของค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากจะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่บริเวณรอยต่อชน ค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดจากการทดลอง คือ รอยต่อชนที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min สภาวะกระบวนการทางความร้อน Weld T6 (WT) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 228.92 MPa ผลการตรวจสอบรอยบกพร่องโดยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีความถูกต้องและแม่นยำกว่าการเอ็กซ์เรย์ ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (TW) พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 0.68 mm

**Thesis Title** Defect Inspection in Friction Stir Weld of SSM Cast 356 Aluminium Alloys with T6 Heat Treatment Using Phased Arrays Ultrasonic to Comparing to X-Ray

**Author** Mr. Worapong Boonchouytan

**Major Program** Industrial and System Engineering

**Academic Year** 2010

### ABSTRACT

The butt joints of semi solid 356 were produced in as cast conditions by friction stir welding process (FSW). This experiment will study in pre/post heat treatment (T6) using the welding speed 160 mm / min with tilt angle tool at 3 degree and tool pin straight cylindrical. The factors of welding were rotating speed rate 1320, 1750 rpm and heat treatment (T6) conditions were determined into (1) As welded (AW) joints, (2) T6 Weld (TW) joints, (3) Weld T6 (WT) joints and (4) T6 Weld T6 (TWT) joints and non destructive inspection (NDT) using Phased Arrays Ultrasonic of inspection comparing to X-Ray. Rotating speed and condition heat treatment (T6) were an important factor to micro, macro structure of metal and mechanical properties of the weld. Increasing rotating speed and different condition heat treatment impacted onto tensile strength due to the defects on joints. Therefore the optimum welding parameter that joint was a rotating speed 1320 rpm, the welding speed 160 mm/min, heat treatment condition Weld T6 (WT) at the highest tensile strength 228.92 MPa Inspection result using Phased Arrays Ultrasonic is accurate more X-Ray. The rotation speed 1,750 rpm welding speed 160 mm / min and the heat treatment before and after welding (TW) were welded defect depth from surface to 0.68 mm.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาส เมืองจันทร์บุรี กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์และติดตามความก้าวหน้าอยู่เสมอ ตลอดจนกรุณาตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโณม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล กรรมการสอบ และ ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาเป็นอาจารย์ กรรมการสอบ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบผลการดำเนินงานความก้าวหน้าของงานวิจัยที่ให้ ข้อเสนอแนะและคำแนะนำ ทำให้เกิดผลดีเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ที่ สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนการดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงไป ด้วยดี และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความสะดวกในการ ดำเนินการวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุน เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยและ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์การทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล และขอขอบคุณทีมงานและผู้ทำการวิจัย อะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งทุกท่านที่ทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถดำเนินงานไปได้ และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการ

ขอขอบคุณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ สนับสนุนเงินทุนงานวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบรอยบกพร่องในแนวเชื่อม และ ขอขอบคุณทีมงานของกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา

ขอกราบขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวบุญช่วยแทน ที่คอยช่วยเหลือ และเป็น กำลังใจมาโดยตลอด ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเป็นกำลังใจในการทำ วิจัยและให้คำปรึกษาให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

วรพงศ์ บุญช่วยแทน

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ   | (3)  |
| Abstract   | (4)  |
| กิตติกรรมประกาศ  | (5)  |
| สารบัญ   | (6)  |
| สารบัญตาราง  | (10) |
| สารบัญภาพ  | (11) |
| บทที่  |      |
| 1. บทนำ  | 1    |
| 1.1 ความสำคัญและที่มา  | 1    |
| 1.2 การตรวจเอกสาร  | 4    |
| 1.3 วัตถุประสงค์   | 12   |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย  | 13   |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                | 13   |
| 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                             | 14   |
| 2.1 โลหะอลูมิเนียม   | 14   |
| 2.1.1 โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม (3xxxx)                         | 18   |
| 2.1.2 อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356                            | 19   |
| 2.2 ขั้นตอนการบ่ม (Age Harding)                              | 20   |
| 2.2.1 ขั้นตอน Solution Treatment                             | 20   |
| 2.2.2 ขั้นตอน Quenching                                      | 22   |
| 2.2.3 ขั้นตอน Aging  | 22   |
| 2.3 กลไกการแพร่อะตอม (Diffusion Mechanism)                   | 22   |
| 2.3.1 การแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion)             | 23   |
| 2.3.2 การแพร่แบบแทนที่ (Substitution Diffusion)              | 23   |
| 2.3.3 การแพร่แบบแทนที่ใน โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 | 24   |
|  | (6)  |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.4 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง   | 25   |
| 2.4.1 กลไกการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Rheocasting                              | 26   |
| 2.4.2 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการหล่อแบบรีโอบาสติง (Rheocasting)              | 27   |
| 2.4.3 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว                 | 29   |
| 2.5 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน   | 30   |
| 2.5.1 องค์ประกอบในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน                                      | 32   |
| 2.5.2 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน  | 33   |
| 2.5.3 แรงกดของเครื่องมือ  | 34   |
| 2.6 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray   | 35   |
| 2.7 การตรวจสอบโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic Testing) | 36   |
| 2.7.1 ระบบการเรียงเฟสคืออะไร  | 37   |
| 2.7.2 รูปแบบการมองเห็นภาพ   | 38   |
| 2.8 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา  | 41   |
| 2.9 การทดสอบแรงดึง  | 41   |
| 2.10 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ   | 42   |
| 2.10.1 การกำหนดขนาดตัวอย่าง   | 42   |
| 2.10.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย                                       | 43   |
| 2.10.3 สมมติฐานในการทดลอง   | 44   |
| 2.10.4 แบบจำลองการถดถอย   | 44   |
| 2.10.5 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ                                     | 45   |
| 2.10.6 การเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparisons)                                    | 47   |
| 2.10.7 การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม        | 49   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 3. วิธีการวิจัย  | 51   |
| 3.1 การออกแบบวิธีการดำเนินงานวิจัย   | 51   |
| 3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย  | 52   |
| 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์   | 53   |
| 3.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบจากอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง 356                                   | 60   |
| 3.5 การเตรียมเครื่องการก่อนเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 61   |
| 3.6 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 64   |
| 3.7 การตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม                                   | 68   |
| 3.8 การทดสอบความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน                                     | 72   |
| 3.9 การตรวจสอบรอบบัพร่องแนวเชื่อม  | 74   |
| 3.10 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ                              | 76   |
| 4. ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย   | 78   |
| 4.1 การตรวจสอบลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม  | 78   |
| 4.1.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min                                | 78   |
| 4.1.2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min                                | 80   |
| 4.1.3 วิเคราะห์ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อน<br>ที่ต่างกัน  | 82   |
| 4.2 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน             | 83   |
| 4.2.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min                                 | 83   |
| 4.2.2 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min                                 | 85   |
| 4.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อม<br>และสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน | 86   |
| 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง   | 87   |
| 4.3.1 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม  | 87   |
| 4.3.2 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min                             | 88   |
| 4.3.3 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min                             | 90   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.3.4 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาครอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อม<br>และสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน | 91   |
| 4.4 การทดลองการทดสอบความแข็งแรงดึง   | 93   |
| 4.4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min                                  | 93   |
| 4.4.2 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min                                  | 94   |
| 4.4.3 วิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อม<br>และสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน  | 95   |
| 4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ                                 | 97   |
| 4.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล   | 98   |
| 4.5.2 ตั้งสมมติฐานของการทดลอง  | 98   |
| 4.5.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ   | 99   |
| 4.5.4 ทดสอบสมมติฐานของการทดลอง   | 102  |
| 4.5.5 การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Fisher  | 105  |
| 4.5.6 การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ได้จากกลุ่ม<br>ตัวอย่าง 2 กลุ่ม            | 108  |
| 4.6 การเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่องด้วยวิธีการเอกซเรย์                                  | 111  |
| 5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ   | 124  |
| 5.1 สรุปผล   | 124  |
| 5.7 ข้อเสนอแนะ   | 126  |
| บรรณานุกรม   | 128  |
| ภาคผนวก  | 132  |
| ก ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล   | 133  |
| ข แผนภาพสมมูลเฟสและภาพโครงสร้างทางจุลภาค   | 135  |
| ค ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 137  |
| ง ค่าความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 139  |
| ประวัติผู้เขียน  | 143  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสม  | 15   |
| 2.2 สัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering)  | 17   |
| 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง   | 46   |
| 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม 356 (W.T.%)   | 52   |
| 3.2 การหาค่าความแปรปรวน   | 76   |
| 3.3 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากการทดลองเบื้องต้น   | 76   |
| 3.4 การกำหนดขนาดของตัวอย่าง   | 77   |
| 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงและประสิทธิภาพของรอยต่อชนกรเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 97   |
| 4.2 ผลการทดลองความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 98   |
| 4.3 ตาราง ANOVA   | 102  |
| 4.4 แสดง ANOVA ของการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm  | 105  |
| 4.5 แสดง ANOVA ของการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm  | 107  |
| 4.6 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + FSW   | 108  |
| 4.7 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + T6 + FSW  | 109  |
| 4.8 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + FSW + T6  | 110  |
| 4.9 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + T6 + FSW + T6   | 110  |
| ผง.1 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเนื้อโลหะเดิม   | 140  |
| ผง.2 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบของพิน 1,320 รอบ/นาที<br>และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตร/นาที ในทุกสภาวะทางความร้อน | 141  |
| ผง.3 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบของพิน 1,320 รอบ/นาที<br>และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตร/นาที ในทุกสภาวะทางความร้อน | 142  |



## สารบัญภาพ

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 3    |
| 2.1 สัญลักษณ์อะลูมิเนียมหล่อผสม  | 16   |
| 2.2 แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม – แมกนีเซียมซิลิไซด์  | 18   |
| 2.3 ขั้นตอนการบ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม- ซิลิกอนหล่อเกรด A356   | 20   |
| 2.4 ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์กับอนุภาคนิวทริ                   | 21   |
| 2.5 ลักษณะการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัว  | 23   |
| 2.6 ลักษณะการแพร่ของอะตอมซิลิกอนภายในเฟส $\alpha - Al$ เป็นแบบแทนที่                                   | 25   |
| 2.7 โครงสร้างแบบเดนไดรต์   | 26   |
| 2.8 โครงสร้างแบบก้อนกลม  | 26   |
| 2.9 วิวัฒนาการและการเติบโตของแข็ง (Solid Particles)  | 27   |
| 2.10 ขั้นตอนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-solid Rheocasting (SSR)                            | 28   |
| 2.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว                 | 30   |
| 2.12 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน   | 31   |
| 2.13 การหมุนของเครื่องมือบนชิ้นงาน ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน   | 32   |
| 2.14 ทิศทางและการกวนของตัวกวน  | 33   |
| 2.15 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)   | 33   |
| 2.16 ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อม FSW ในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม   | 35   |
| 2.17 ลักษณะการถ่ายภาพรังสี   | 36   |
| 2.18 ลักษณะการใช้อัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ตรวจสอบงานเชื่อม  | 37   |
| 2.19 การประกอบหัวตรวจแบบเรียงเฟส   | 37   |
| 2.20 ลักษณะรูปร่างลำแสงคลื่นเสียง (ซ้าย) ภาพสะท้อนการกวาดภาพลำแสงตรง (ขวา)                             | 38   |
| 2.21 ลักษณะรูปร่างลำแสงคลื่นเสียง (ซ้าย) ภาพสะท้อนการกวาดภาพลำแสงทำมุม (ขวา)                           | 39   |
| 2.22 ลักษณะรูปร่างลำแสงคลื่นเสียง (ซ้าย) ภาพสะท้อนการกวาดภาพลำแสงซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของรูเจาะ (ขวา) | 39   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.23 ลักษณะรูปร่างสำแสงคลื่นเสียงและการเคลื่อนที่ (ซ้าย)<br>ภาพการเรียงเฟสของ C-Scans และตำแหน่งของรูเจาะ (ขวา) | 40   |
| 2.24 ลักษณะรูปร่างสำแสงคลื่นเสียงและการเคลื่อนที่ (ซ้าย)<br>ภาพสะท้อนการเรียงเฟส (ขวา)                          | 41   |
| 3.1 วิธีดำเนินงานวิจัย  | 51   |
| 3.2 Mold ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน   | 52   |
| 3.3 ชิ้นทดสอบของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356   | 53   |
| 3.4 เครื่องกัดแนวตั้ง   | 54   |
| 3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน   | 54   |
| 3.6 เตาเผาอุณหภูมิ 52   |      |
| 3.7 เครื่องขัดกระดาษทราย ขัดสักหลาด   | 55   |
| 3.8 กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า   | 56   |
| 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง   | 56   |
| 3.10 ลักษณะของหัวกวน (Tool Pin Profile)   | 57   |
| 3.11 ลักษณะของจิก (Jig)   | 57   |
| 3.12 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึด (Step Clamp)  | 58   |
| 3.13 เครื่องอัลตราโซนิกแบบเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic)   | 58   |
| 3.14 เครื่องเอกซเรย์ (X-Ray)  | 59   |
| 3.15 การทดสอบแรงดึง   | 59   |
| 3.16 การกัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อกิ่งของแข็ง   | 60   |
| 3.17 ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 ที่ผ่านการกัด<br>และตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน                | 60   |
| 3.18 การปรับมุมเอียง 3 องศา ของเครื่องกัดแนวตั้ง  | 61   |
| 3.19 การปรับความเร็วรอบของเครื่องกัดแนวตั้ง   | 62   |
| 3.20 การปรับความเร็วเดินเชื่อมของเครื่องกัดแนวตั้ง  | 62   |
| 3.21 ส่วนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 63   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.22 การจับยึดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน   | 64   |
| 3.23 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 65   |
| 3.24 การวัดค่าแรงกดในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM 356 โดยใช้ Load cell  | 66   |
| 3.25 ขั้นตอนในการทำกระบวนการทางความร้อน T6  | 67   |
| 3.26 การ Lay out ชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล   | 68   |
| 3.27 รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่มีความสมบูรณ์  | 69   |
| 3.28 รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่ไม่สมบูรณ์   | 69   |
| 3.29 ชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยา Epoxy  | 70   |
| 3.30 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา   | 70   |
| 3.31 โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน   | 71   |
| 3.32 โครงสร้างมหภาคด้วยกล้อง OM   | 71   |
| 3.33 ขนาดมาตรฐาน ASTM ของชิ้นทดสอบ  | 72   |
| 3.34 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึงของเนื้อ โลหะเดิม   | 72   |
| 3.35 การเตรียมชิ้นทดสอบของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน   | 73   |
| 3.36 การทดสอบแรงดึง   | 73   |
| 3.37 ลักษณะของหัวตรวจสอบ (Wedges) ของเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส   | 74   |
| 3.38 ลักษณะของเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic)   | 74   |
| 3.39 ลักษณะชิ้นงานเชื่อมก่อนตรวจหาสิ่งบกพร่องด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส  | 75   |
| 3.40 ลักษณะการตรวจหาสิ่งบกพร่องด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส  | 75   |
| 4.1 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min (RS) Retreating Side,<br>(AS) Advancing Side   | 80   |
| 4.2 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min (RS) Retreating Side,<br>(AS) Advancing Side   | 81   |
| 4.3 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ 1,320 rpm 160 mm/min<br>(RS) Retreating Side, (AS) Advancing Side, (TMAZ) Thermo-Mechanical Affected Zone,<br>(SZ) Stir Zone, (BM) Base Metal | 84   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.4 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ 1,750 rpm 160 mm/min<br>(RS) Retreating Side, (AS) Advancing Side, (TMAZ) Thermo-Mechanical Affected Zone,<br>(SZ) Stir Zone, (BM) Base Metal | 86   |
| 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิม (ก) บริเวณเนื้อโลหะเดิมของ<br>สภาวะทางความร้อน T6 (ข) และ บริเวณเนื้อโลหะเดิมของสภาวะทางความร้อน<br>Artificially aged (ค)                        | 88   |
| 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm<br>และ 160 mm/min  | 90   |
| 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm<br>และ 160 mm/min  | 91   |
| 4.8 กราฟค่าความแข็งแรงดึงงานเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min  | 94   |
| 4.9 กราฟค่าความแข็งแรงดึงงานเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min  | 95   |
| 4.10 กราฟค่าความแข็งแรงดึง ที่ 1,320, 1,750 rpm และ 160 mm/min  | 96   |
| 4.11 กราฟการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง   | 99   |
| 4.12 กราฟลักษณะการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล   | 100  |
| 4.13 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน  | 101  |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับความเร็วยรอบ<br>และปัจจัยสภาวะทางความร้อน   | 103  |
| 4.15 อันตรกิริยา ค่าความแข็งแรงกับความเร็วในการเชื่อม   | 104  |
| 4.16 फिल्मเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW (1,320/160)   | 111  |
| 4.17 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW<br>(1,320/160)   | 112  |
| 4.18 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW (1,320/160)   | 112  |
| 4.19 फिल्मเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW (1,320/160)  | 113  |
| 4.20 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW<br>(1,320/160)  | 113  |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.21 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW (1,320/160)                       | 114  |
| 4.22 ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW + T6 (1,320/160)                           | 114  |
| 4.23 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW + T6 (1,320/160)      | 115  |
| 4.24 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW + T6 (1,320/160)                       | 115  |
| 4.25 ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,320/160)                      | 116  |
| 4.26 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,320/160) | 116  |
| 4.27 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,320/160)                  | 117  |
| 4.28 ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW (1,750/160)                                | 117  |
| 4.29 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW (1,750/160)           | 118  |
| 4.30 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW (1,750/160)                            | 118  |
| 4.31 ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW (1,750/160)                           | 119  |
| 4.32 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW (1,750/160)      | 119  |
| 4.33 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW (1,750/160)                       | 120  |
| 4.34 ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW + T6 (1,750/160)                           | 120  |
| 4.35 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW + T6 (1,750/160)      | 121  |
| 4.36 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW + T6 (1,750/160)                       | 121  |
| 4.37 ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,750/160)                      | 122  |
| 4.38 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,750/160) | 122  |
| 4.39 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,750/160)                  | 123  |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| ผข. 1 แผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิไซด์<br>(Aluminum - Magnesium - Silicide Phase Diagram) | 136  |
| ผข. 2 โครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356  | 136  |
| ผค. 1 กราฟค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  | 138  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่หล่อด้วยกระบวนการไดคาสติง (Die Casting) ในอุตสาหกรรมยานยนต์มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ รวมถึงอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนอากาศยาน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรและอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดน้ำหนักและการใช้พลังงาน ดังนั้น จึงมีการแข่งขันทางด้านเทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมที่หล่อด้วยกระบวนการไดคาสติงกันอย่างกว้างขวางเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพในการผลิต

เทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการหล่อ Die Casting ในปัจจุบัน คือ กรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi Solid Metal: SSM) ที่มีเทคโนโลยีการฟุ้งแก๊สในน้ำโลหะ Gas Induced Semi-Solid (GISS) (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2549) เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่คล้ายกับกรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อย (แก๊สอาร์กอน หรือไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์ในปริมาณที่น้อยมาก ทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่แข็งตัว และได้โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Spheroidal Grain) การนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมภายในประเทศนั้น โดยเฉพาะงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป (Materials Forming) และการซ่อม (Repairing) อะลูมิเนียมหล่อก็จะมี การเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อในกลุ่มเดียวกัน (Similar Joint) และการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกับโลหะชนิดอื่น (Dissimilar Joint) (กิตติพงษ์ กิตติมะ และคณะ, 2550) อีกทั้งการเชื่อมก็มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตในด้านการประกอบชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีงานเชื่อมมาใช้ในงานอุตสาหกรรมให้เหมาะสมกับสภาพของงาน และข้อจำกัดในการเชื่อมที่จะส่งผลกระทบต่อในด้านต่างๆ ของรอยเชื่อม

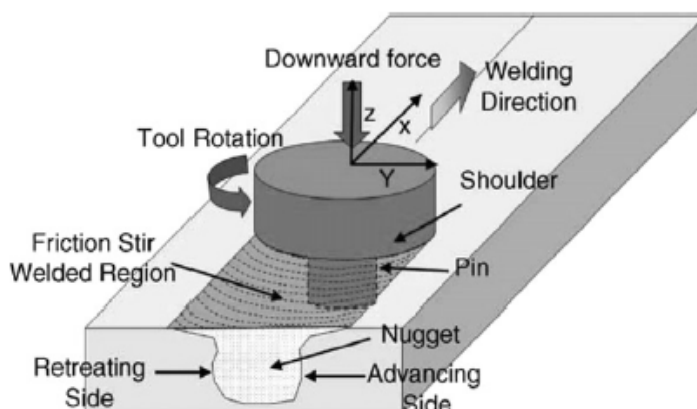
กระบวนการเชื่อมมีอยู่หลายวิธี ในการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการผลิตในงานอุตสาหกรรมนั้นๆ การเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากการอาร์คเรียกว่า การเชื่อมแบบหลอมละลาย ซึ่งจะมีการแพร่ความร้อนที่ได้จากการอาร์คจะทำให้เกิดการหลอม

ละลายเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะบริเวณบ่อหลอม การหลอมละลายของเนื้อโลหะหลังจากการเชื่อมเมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้อาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิมของโลหะนั้น อาจจะมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) การบิดงอ (Distortion) การแตกร้าวของรอยเชื่อม (Welding Crack) ในระหว่างการแข็งตัวจากการหลอมละลายและมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเชื่อมอะลูมิเนียม คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อมให้ใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากที่สุด การเชื่อมโดยการหลอมละลายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Changes) (ประกาศ เมืองจันทร์บุรี, 2550) ส่งผลทำให้แนวเชื่อม (Welding Region) มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมลดลงตามไปด้วย

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็งที่คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute: TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมต่างๆ มากมาย (Thomas W.M. et al., 1991, 1997) กระบวนการ FSW ทำให้เกิดโครงสร้างของแนวเชื่อมที่มีเกรนเล็กละเอียด สามารถรับแรง ได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายไม่สามารถทำได้ (Mishra R.S. and Ma Z.Y., 2005) แต่การเชื่อมเสียดทานแบบกวนก็มีโอกาสที่เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมสูงเช่นกัน เนื่องจากมีปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมหลายปัจจัยเช่น ความเร็วรอบของตัวกวน ความเร็วเดินเชื่อม รูปแบบหัวกวนและการเชื่อมในสถานะที่ต่าง ๆ กัน แสดงดังภาพที่ 1.1 ซึ่งจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นอาจมีหลากหลายรูปแบบและขนาดที่แตกต่างกันเช่น การเกิดรอยร้าวเล็กๆ (Crack) ช่องว่างจากการเชื่อม (Void) เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม SSM 356 พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถเพิ่มสมบัติทางกลของแนวเชื่อมดีกว่าเนื้อโลหะเดิม (อับดุล บินระหีม และคณะ, 2551; ชงชัย เครือผือ และประกาศ เมืองจันทร์บุรี, 2551) และเมื่อไม่นานมานี้มีผู้ทำการทดลองปรับปรุงสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน คือ การนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำ จากนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวให้สูงขึ้น (Akhter R. et al., 2007; Moller H., et al., n.d.) เช่น 2219-O แสดงให้เห็นว่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อมสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวให้สูงขึ้นได้ ทำให้การนำไปใช้งานเหมาะสมที่สุดกับงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกกร่อนและความแข็งแรงสูง (Chen Y.C. et al., 2005) แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนของการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 356 ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ที่มีโครงสร้างเกรนแบบก่อนกลมนั้น ยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก



การตรวจหาสิ่งบกพร่องในแนวเชื่อมมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing) การทดสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก (Magnetic Testing) การทดสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current Testing) เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing: NDT) การตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส (Phased Arrays Ultrasonic) ก็เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างประเทศทั้งในด้านประกันคุณภาพการผลิต การซ่อมบำรุงรวมไปถึงการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต สำหรับในประเทศไทยนั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่อยู่ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ปัญหาสำคัญในการใช้วิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสคือ การประเมินหาขนาด รูปร่างและชนิดของสิ่งบกพร่อง ต้องขึ้นกับความสามารถของผู้ปฏิบัติการ ความน่าเชื่อถือต่อผลการตรวจสอบมีน้อย เมื่อเทียบกับการถ่ายภาพรังสีซึ่งสามารถมองเห็นขนาดและรูปร่างของสิ่งบกพร่องจากฟิล์มถ่ายภาพโดยตรงซึ่งนับว่าฟิล์มเป็นเอกสารอ้างอิงที่น่าเชื่อถือ และเป็นข้อดีของการถ่ายภาพรังสี ขณะเดียวกันข้อเสียของการถ่ายภาพรังสี คืออันตรายจากรังสีที่ใช้ ซึ่งเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ไม่มีปัญหาดังกล่าว ในระยะหลังเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ได้ถูกพัฒนาจึงทำให้ข้อมูลต่างๆสามารถส่งถ่ายต่อไปยังคอมพิวเตอร์ได้ ทำให้สามารถที่จะพัฒนาการประเมินผลได้รวดเร็วและแม่นยำขึ้น โดยนำเอาข้อมูลของตำแหน่ง หัวตรวจสอบ (Probe) ซึ่งสแกนไปบนผิวของชิ้นงานและตำแหน่งความลึกของสิ่งบกพร่องในแต่ละจุดมาประมวลให้เห็นรูปร่างและขนาดของสิ่งบกพร่องได้อย่างชัดเจนขึ้น



ภาพที่ 1.1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Rajiv S.M. and Murray W.M., 2007)

ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความสนใจในการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม SSM 356 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่เหมาะสมและการตรวจหาสิ่งบกพร่องในแนวเชื่อมด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส เทียบกับการเอ็กซ์เรย์

## 1.2 การตรวจเอกสาร

เจษฎา วรรณสินธุ์ (2549) ได้ศึกษาการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง กล่าวว่า การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง ถูกคิดค้นที่ Massachusetts Institute of Technology (MIT) เมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว การหล่อโลหะกึ่งของแข็ง คือ การขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน ส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) ด้วยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง การหล่อโลหะกึ่งของแข็งซึ่งมีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะทำให้การไหลราบเรียบ (Non-Turbulent) การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ประโยชน์ของการหล่อ SSM ได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตแบบ Rheocasting หลายวิธีเพื่อการลดต้นทุน เทคโนโลยีการหล่อ SSM ได้มีการใช้งานแพร่หลายในการหล่อ Die Casting เพื่อเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ เป็นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle Time) การลดของเสีย (Reject) เพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และลดต้นทุนในการอบชุบ การพัฒนากรรมวิธี Rheocasting ที่มีราคาถูกและใช้กับเครื่อง Die Casting ทั่วไป ได้ที่มวิจัยที่นำโดยนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และ MTEC โดยมีที่ปรึกษาจากสหรัฐอเมริกา รวมทั้ง Prof.Merton Flemings จาก MIT กำลังวิจัยและพัฒนากรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่โดยการปล่อยก๊าซเฉื่อย (แก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์ที่มีรูพรุนในปริมาณที่น้อยมาก เพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่โลหะแข็งตัวเกรนที่มีลักษณะก้อนกลม

การเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีผู้ศึกษา เช่น Zah M.F. and Eireiner B (2004) กล่าวว่า การเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อกันที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เพราะที่อุณหภูมิหลอมละลาย เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างใหม่ ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่สถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง ซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยมีแรงกดขณะเชื่อม ตัวแปรที่

เกี่ยวข้อง คือ แรงกด (Down Force) ความเร็วรอบในการหมุนของหัวเชื่อม ความเร็วของการเดินเชื่อม (Welding Speed) และมุมเอียงของหัวเชื่อม ซึ่งมีผลสอดคล้องกับ Kim Y.G. et al (2005) กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถต่อวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ( $T_M$ ) และโครงสร้างเดิมถูกกวนให้เป็นเกรนที่ละเอียด ไม่มีลักษณะของรูพรุนและโครงสร้างของเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม ดังนั้น การต่อโลหะผสมอื่นๆ สามารถเชื่อมต่อกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมหล่อผสมมีความเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้อย่างเหมาะสมและอย่างมีนัยสำคัญ มีปัจจัยสำคัญหลายอย่างในการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยการควบคุมแรงกด ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมของการเชื่อมเสียดทาน ปัจจัยในการเชื่อมคุณภาพของรอยต่อและข้อบกพร่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อผสมมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ลักษณะข้อบกพร่องมี 3 ประการ ประการแรก ปริมาณความร้อนที่ได้รับมากเกินไปทำให้เกิดครีบในปริมาณที่มาก ประการที่สอง ความร้อนที่ได้รับไม่เพียงพอ เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างในรอยเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานที่ได้รับมีน้อยเกินไป ประการที่สาม การกวนที่ผิดปกติเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่าง ดังนั้น ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากความร้อนและการกวน มีผลต่อความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม อย่างมีนัยสำคัญ

การวิจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม ADC12 ซึ่งหล่อด้วยกรรมวิธีไดคาสติงโดยใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) Kim Y.G. et al (2006) พบว่าจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (เฟสแอลฟา) และเฟส Eutectic (Al+Si) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลประกอบไปด้วยโครงสร้างที่บิดเบี้ยวผิดปกติไปจากเดิมของโครงสร้างเดนไดรต์และ Eutectic ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากความร้อนทางกล และบริเวณรอยเชื่อมจะมีผลึกใหม่เกิดขึ้น (Recrystallized) โดยจะไม่มีโครงสร้างหล่อ (Cast Structure) อยู่ด้วยโครงสร้างประกอบไปด้วยอนุภาค Si เล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในอะลูมิเนียมเมตริกซ์ อันเนื่องมาจากอิทธิพลจากความร้อนทางกล จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM พบว่าขนาดอนุภาค Si บริเวณด้านล่างรอยเชื่อมมีขนาดเล็กกว่าด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากด้านล่างรอยเชื่อมมีอุณหภูมิจากการเสียดทานของหัวพินมากกว่าด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อม นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมที่เชื่อมโดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่ามากกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป ในรายงานยังได้กล่าวถึงผลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียม ADC12 ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม ได้แก่ แรงกด (Down Force) ความเร็วในการหมุนของ Tools (rpm) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding Speed) และมุมเอียงของ Tools (Tilt Angle) ได้ข้อสรุปว่าตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนส่งผลให้โครงสร้าง

ทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเช่น โครงสร้างเกรนและอนุภาค Si เล็กกระจายทั่วไปในบริเวณที่ถูกกวนรวมถึงค่าความแข็งและความแข็งแรงซึ่งมากกว่าบริเวณ โลหะเดิม ซึ่งสอดคล้องกับ ปรากฏการณ์เมืองจันทร์บุรี และคณะ (2550) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการเชื่อมอะลูมิเนียมด้วย TIG และ FSW ที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง การเชื่อมโดยการหลอมละลาย ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง โดยเฉพาะบริเวณที่ไม่มีการหลอมละลายมีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน โครงสร้างแตกต่างไปจากเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่มีการหลอมละลายโครงสร้างเป็นเดนไดรท์ที่ละเอียด (Fine Dendrite Structure) นอกจากนี้ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม การเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็งเป็นกระบวนการเชื่อมที่เชื่อมประสานโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อกันที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เพราะเมื่อโลหะแข็งตัวก็จะมีเกิดการเกิดโครงสร้างใหม่ขึ้น ซึ่งอาจจะไม่เหมือนโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากการศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง (SSM A356) ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โครงสร้างบริเวณที่ถูกกวนเป็นผลึกใหม่ (Recrystallized) ไม่มีโครงสร้างหล่อ (Cast Structure) ค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมที่เชื่อมโดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีค่าสูงกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถที่จะเชื่อมต่อกับโลหะชนิดอื่นๆ ได้ เช่น อะลูมิเนียมกับเหล็กกล้า เป็นต้น ดังนั้น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงมีบทบาท โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม ในทำนองเดียวกันการศึกษาปัจจัยการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM A356 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การปรับปรุงสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน Lee W.B et al (2003) ได้ศึกษาโดยใช้หัวพินแบบเกลียววนรอบกำหนดให้ความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,600 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 87 ถึง 342 mm/min จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างจากกล้อง OM บริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา ( $\alpha$ ) กับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย Al+Si โครงสร้างของโลหะบริเวณที่ถูกกวน (SZ) จะมีลักษณะอนุภาค Si เล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญที่ทำให้โครงสร้างผิดรูปไปจากเดิม ด้วยอนุภาค Si กระจายเป็นเส้นยาวตามลักษณะทิศทางการกวนของหัวพิน และโครงสร้างจากกล้อง SEM ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมอนุภาคซิลิกอนมีรูปร่างเป็นแท่งยาว กระจายตัวในเฟสแอลฟา ( $\alpha$ ) และเฟส Eutectic แต่ในบริเวณที่ถูกกวนจะมีอนุภาค Si เล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออันเนื่องมาจากการแตกหักของอนุภาค Si ที่เป็นแท่งในเนื้อโลหะเดิม และที่สำคัญการเปรียบเทียบความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณรอยเชื่อม โดยการเปรียบเทียบแล้วสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม และที่สำคัญอนุภาค Si ที่เกิดจากปฏิกิริยา Eutectic ในบริเวณที่นอกเหนือจากบริเวณที่ถูกกวน (SZ) ความเค้นแรงดึงของโลหะบริเวณที่ถูกกวนสูงขึ้น

และได้พิสูจน์ให้เห็นค่าที่มากกว่า 178 MPa เกือบ 120% ของโลหะเดิมเพราะฉะนั้นการเชื่อมอะลูมิเนียม A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีข้อดีในการประยุกต์กับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อผสม ในทำนองเดียวกันของ อับดุล บินระหีม และคณะ (2551) ได้นำเสนอเกี่ยวกับการเชื่อมแบบต่อชนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง (Semi Solid Metal: SSM) A356 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) โดยการศึกษาปัจจัยในการเชื่อมที่สามารถควบคุมได้ มี 2 ปัจจัยคือ ปัจจัย (A) ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือ (Tool) 1,320, 1,750 rpm (B) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม มี 3 ระดับ 80, 120, 160 mm/min ความเร็วรอบ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และแรงกด เป็นปัจจัยสำคัญที่ให้ค่าความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน มีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ค่าความแข็งแรงสูงสุด 172.61 MPa แรงกดและความร้อนจากการเสียดทานต่ำ ทำให้เกิดช่องว่าง ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าต่ำ Interaction ของปัจจัย A และ B ไม่มีอิทธิพลต่อผลการทดลอง ส่วน Main Effect ความเร็วรอบ (rpm) และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (mm/min) มีอิทธิพลต่อผลการทดลอง ซึ่งไม่เกิดความแตกต่างกันจากการศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง SSM A356 ของ ชงชัย เครือศรี และประภาส เมืองจันทร์บุรี (2551) กล่าวว่า การเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง (Semi Solid Metal: SSM) A356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยในการศึกษาจะใช้ Tool Pin 2 ชนิด คือ หัวพินแบบทรงกระบอก (Straight Cylindrical) และแบบสี่เหลี่ยม (Square) มีตัวแปรคงที่ คือ ความเร็วในการหมุนของ Tool ที่ใช้ 1,750 rpm และตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง คือ อัตราความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) ที่ ใช้ 80, 120 และ 160 mm/min โดยมีมุมเอียงของ Tool (Pin) ที่ใช้ 3 องศาบริเวณรอยเชื่อมของทั้งสามความเร็วเดินเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อย่างไรก็ตามที่ 160 mm/min ของหัวพินทรงกระบอก บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดรูโพรงด้านล่างของหัวพินตลอดความยาวของแนวเชื่อมค่าความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมและแบบทรงกระบอก ทั้งสามความเร็วเดินเชื่อมมีค่าที่ใกล้เคียงกันบริเวณที่ถูกกวนมีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมค่าความแข็งแรงดึงของ ครั้งที่ 1 ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 mm/min ค่าของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าสูงกว่าแบบสี่เหลี่ยม ที่ 160 mm/min ค่าของหัวพินทรงกระบอกมีค่าต่ำกว่าหัวแบบสี่เหลี่ยม อันเนื่องมาจากบริเวณแนวเชื่อมมีรูโพรงที่เกิดจากการกวนของหัวพิน ครั้งที่ 2 ในทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม ค่าความแข็งแรงของหัวพินแบบทรงกระบอก บริเวณเนื้อเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าหัวแบบสี่เหลี่ยม มีผลสอดคล้องกันกับ Ma Z.Y. et al (2006) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมหล่อ A356 ที่ผ่านการหล่อในสภาวะปกติ โดยจะเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนของ Tool และ

ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินต่ำจะมีลักษณะรอยเชื่อมกว้างและที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสูงจะมีลักษณะคล้ายกับวงรี จากการตรวจสอบไม่พบความบกพร่องในรอยเชื่อม โครงสร้างจากกล้อง OM พบว่าโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบด้วยเฟสแอลฟา ( $\alpha$ ) หรือเดนไดรต์ และเฟส Eutectic (Al+Si) บริเวณรอยเชื่อมมีความหนาแน่นสูงมากประกอบไปด้วยโครงสร้างที่ละเอียดและอนุภาค Si ประมาณ 0.25-0.42 ไมครอน กระจายตัวในอะลูมิเนียมเมตริกซ์ อันเนื่องมาจากเกิดจากการแตกหักของเดนไดรต์ โครงสร้างจากกล้อง SEM พบว่าที่ความเร็วในการหมุนของ Tool และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีการกระจายตัวของอนุภาค Si เป็นแบบกลุ่มก้อนในบริเวณด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อมแต่จะพบว่าอนุภาค Si มีขนาดเล็กๆ อยู่ในบริเวณด้านซ้าย ขวา และด้านล่าง ของรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากบริเวณด้านซ้าย ขวา และด้านล่างได้รับการเสียดทานและแรงอัดมากกว่าด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อม จึงทำให้ที่ความเร็วในการหมุนของ Tool สูงเกิดความร้อนในการเสียดทานมากกว่าความเร็วในการหมุนของ Tool ต่ำ ส่งผลให้อนุภาค Si มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และที่ความเร็วในการหมุนของ Tool ต่ำจะมีความหนาแน่นในการกระจายตัวของอนุภาคน้อยและเป็นกลุ่มก้อนในบริเวณที่ถูกกวน อย่างไรก็ตามอนุภาคเหล่านี้จะยังไม่แสดงผลมากนัก แต่จะมีผลมากที่สุดต่อเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อน

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 ของสิริพร ชันทองคำ (2552) ได้ศึกษาโดยกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปคือ GISS-SC (Gas Induced Semi Solid Squeezed Casting) และกระบวนการทางความร้อนที่ใช้คือ T5 และ T6 โดยกระบวนการ T5 กระทำโดยนำชิ้นงานไปบ่มโดยไม่ได้อบละลาย และกระบวนการ T6 ประกอบด้วยขั้นตอนการอบละลาย (Solution Treatment) ที่อุณหภูมิ 520°C และ 540°C เป็นระยะเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง และผ่านขั้นตอนการชุบ (Quenching) ด้วยการชุบชิ้นทดสอบในน้ำและนำชิ้นทดสอบเหล่านั้นผ่านขั้นตอนการบ่ม (Aging) ด้วยการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 135, 165 และ 195°C เป็นระยะเวลา 4, 8, 12 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ ชิ้นทดสอบในสภาวะหล่อ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส  $\alpha$ -Al ที่เป็นแบบก้อนกลม (Globular Structure) ที่ล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติก (Eutectic Silicon) มีลักษณะเป็นแท่งยาวปลายแหลม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคภายหลังการบ่มในทุกสภาวะพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบละลายมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกันคือ เฟสยูเทคติกซิลิกอนจะมีความกลมมนมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการแพร่ของอะตอมซิลิกอนจากเฟสยูเทคติกละลายเข้าสู่เนื้อเมตริกซ์ ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ที่ให้สมบัติด้านทานแรงดึงสูงสุดคือที่สภาวะการอบละลายที่ อุณหภูมิ 540°C เป็น

ระยะเวลา 8 ชั่วโมง และบ่ม ที่อุณหภูมิ 165°C เป็นระยะเวลา 12 มีผลสอดคล้องกันกับ Moller H. et al (n.d.) การทำกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 540°C ช่วยเสริมให้อะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อแบบ RheoCasting มีผลที่ดี ซึ่งปกติอะลูมิเนียม A356-T6 จะมีขั้นตอนการบ่มเทียมนี่มีอิทธิพลและสำคัญมากในการปรับปรุงคุณสมบัติที่ดีในภายหลัง จากผลการทดลองการบ่มเทียมนในช่วงอุณหภูมิ 160-190°C จะมีสมบัติทางกล (ค่าความแข็ง) ที่ดีที่สุด มีผลไปในทิศทางเดียวกันกับ Alan P.D. et al (2001) ได้นำกระบวนการทางความร้อน T5 มาใช้ในการปรับสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง A356 ได้ทำผ่านกระบวนการ T5 โดยบ่มที่ 167°C เป็นเวลา 11 ชั่วโมงในขณะที่ T6 ต้องทำการอบละลาย 8 ชั่วโมงที่ 500°C และชุบในน้ำ ก่อนนำไปบ่ม 11 ชั่วโมงที่ 166°C จากผลการวิจัยพบว่าความแข็งแรง ณ จุดครากของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ T6 สูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T5 อย่างไรก็ตามผลการศึกษา % Elongation ของชิ้นงานที่ผ่าน T6 (12%) สูงกว่า T5 (7%) ส่วนโครงสร้างจุลภาคพบว่าเฟสซิลิกอนในชิ้นงานที่ผ่าน T5 ไม่มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงและรูปร่างยังไม่เป็นทรงกลม ต่างจากชิ้นงานที่ผ่าน T6 จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่าน T5 มีความเปราะมากกว่า

จากการศึกษาค้นคว้าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมและกระบวนการทางความร้อน จึงได้มีแนวคิดที่จะศึกษาในเรื่องของกระบวนการทางความร้อนที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม เช่น Chen Y.C. et al (2005) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อสมบัติทางกลของกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การทดลองใช้อะลูมิเนียมเกรด 2219-O มีความหนา 5 มิลลิเมตร ความเร็วหมุนของหัวพิน 800 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 100 200 300 และ 400 mm/min โดยกระบวนการทางความร้อนจะนำวัสดุผ่านกระบวนการอบละลาย (Solution Treatment) ที่อุณหภูมิ 535°C เป็นเวลา 32 นาที และชุบ (Quenching) ในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C หลังจากนั้นบ่มเทียมน (Artificial Aging) ที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ไม่ทำกระบวนการทางความร้อนมีค่าคงที่ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (Elongation) อยู่ในช่วงประมาณ 10-12% รอยขาดจากการดึงเกิดขึ้นบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) ไม่เกิดรอยแตก (Crack) บริเวณแนวเชื่อม อีกทั้งค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มสูงขึ้นในบริเวณแนวกวน (Stir Zone) แต่ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ผ่านทำกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความแข็งแรงดึงก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดย่น้อยอยู่ในช่วงประมาณ 1-3% และเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าเปอร์เซ็นต์การยืดย่นก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน รอยขาดจากการดึงเกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อมเพราะมีสาเหตุมาจากการเกิดรอยแตกซึ่งเป็นอิทธิพลจากกระบวนการทางความร้อน อีกทั้งค่าความแข็งแรงดึงคงที่ทั้งในบริเวณแนวกวน

และบริเวณเนื้อโลหะเดิม แต่สำหรับในงานของ Elangovan K. and Balasubramanian V. (2008) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อสมบัติทางกลของกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การทดลองใช้อะลูมิเนียมรีดขึ้นรูปเกรด AA6061 มีความหนา 6 มิลลิเมตร มีสภาวะของการทดลองคือคือ (1) As Welded (AW) joints, (2) Solution Treated (ST) joints, (3) Solution Treated and Aged (STA) joints และ (4) Artificially Aged (AG) joints โดยกระบวนการทางความร้อนจะนำวัสดุผ่านกระบวนการอบละลาย (Solution Treatment) ที่อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 60 นาที และชุบ (Quenching) ในน้ำหลังจากนั้นบ่มเทียม (Artificial Aging) ที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากการทดลองทั้งสี่แบบพบว่า การทำ Artificially Aged ให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมดีที่สุด รอยเชื่อมในแบบ As Welded ให้ประสิทธิภาพของแนวเชื่อม 66% แต่การทำ Artificially Aged หลังจากการเชื่อมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแนวเชื่อมเป็น 77% การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของ  $Mg_2Si$  และการตกตะกอนอย่างละเอียดเป็นผลทำให้สมบัติแรงดึงของแนวเชื่อม Artificially Aged มีค่าดีกว่าแนวเชื่อมแบบอื่นๆ ซึ่งมีข้อแตกต่างของงานวิจัยทั้งสองคือ งานวิจัยของ Chen Y.C. et al (2005) ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (T6) มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความแข็งแรงดึงก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนงานวิจัยของ Elangovan K. and Balasubramanian V. (2008) การทำ Artificially Aged ให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมดีที่สุด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแนวเชื่อมเป็น 77% ส่วนการศึกษากระบวนการทางความร้อนที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายของอะลูมิเนียมผสมซึ่งมีผลสอดคล้องกัน Akhter R. et al (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน T6 ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง Rheocasting หมายเลข A356 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ซึ่งมีสภาวะการเชื่อม คือ (1) As weld (2) T6 Weld และ (3) Weld T6 โดยกระบวนการทางความร้อนจะนำวัสดุผ่านกระบวนการอบละลาย (Solution Treatment) ที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและชุบ (Quenching) ในน้ำหลังจากนั้นบ่มเทียม (Artificial Aging) ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าบริเวณแนวเชื่อมแบบแรกและแบบที่สองเกรนเปลี่ยนจากเกรนก่อนกลมของ  $\alpha-Al$  เป็นแบบเดนไดรต์ ส่วนแนวเชื่อมแบบที่สามเฟสยูเทคติกเปลี่ยนรูปร่างจากเดิมซึ่งเป็นแผ่นยาวและรูปร่างไม่แน่นอนไปเป็นอนุภาค Si ที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลม ในขณะที่ความแข็งและความแข็งแรง ณ จุดครากเพิ่มจากเดิม 62 Hv และ 150 MPa ไปเป็น 125 Hv และ 310 MPa โดยลำดับ ทั้งนี้ % Elongation ของชิ้นงานก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือ จากเดิม 12% ไปเป็น 10% อีกทั้งกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมมีปัญหาการพองของผิวงาน (Blistering) เช่นการศึกษาของ Lumley R.N. et al (2007) แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมหล่อชนิดขึ้นรูป



ความดันสูง ปกติจะไม่สามารถกระทำที่อุณหภูมิสูงได้เพราะปัญหาการเกิดรูพรุนหลังจากการหล่อ จะทำให้เกิดการพุพองของผิวงาน (Blistering) ซึ่งเกิดจากการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงและเป็นเวลานาน ทำให้รูพรุนที่มีอากาศอยู่ใต้ผิวงานเกิดการดันตัวและพุพองออกมานอกผิวงานในที่สุด แต่สามารถหลีกเลี่ยงการพุพองของผิวงานได้ด้วยวิธีการกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาสั้นอุณหภูมิต่ำ

อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบกวนก็จะมีโอกาสที่เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมสูงเช่นกัน เช่น การเกิดรอยร้าวเล็กๆ (Crack) ช่องว่างจากการเชื่อม (Void) เป็นต้น จากการศึกษาของ Lambard H. et al (2007) กล่าวว่า การปรับเปลี่ยนปัจจัยความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลให้รอยเชื่อมขาดความสมดุล เกิดช่องว่างการตรวจสอบทางกายภาพจากลักษณะผิวภายนอกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมไม่สามารถมองเห็นข้อบกพร่องในรอยเชื่อมได้จึงต้องใช้ผลของการ X-Ray โดยใช้รังสีเอกซ์ ส่งผ่านชิ้นทดสอบงานเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ภาพรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 จะปรากฏผลของข้อบกพร่องบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวน และส่วนต่างๆ ของงานเชื่อม วิเคราะห์ผลจากภาพร่วมกับข้อมูลในการเชื่อมและผลทางโลหะวิทยาของปัจจัยที่กำหนดในการทดลองแต่ละระดับ การตรวจสอบหารอยบกพร่องยังสามารถใช้อัลตราโซนิกได้ด้วย เช่น (Johnston P.H., n.d.) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมออกไซด์จะครอบคลุมอยู่บริเวณด้านบนชิ้นงานเชื่อม โดยธรรมชาติอะลูมิเนียมออกไซด์จะฝังตัวในเนื้อเชื่อมและจะเป็นตัวลดความแข็งแรงของแนวเชื่อม จึงมีแนวความคิดนำอัลตราโซนิกมาใช้ในการตรวจสอบรอยเชื่อมเพื่อหารอยบกพร่องในงานเชื่อม โดยใช้ระดับความถี่ที่แตกต่างกัน แสดงอนุภาคที่แตกต่างกันของเกรน การใช้อัลตราโซนิกมีความแม่นยำสูงและเหมาะสมกับการตรวจสอบแนวเชื่อม ในทำนองเดียวกันกับ Lamarre A. and Moles M. et al (2000) เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) มีประโยชน์ต่อการเชื่อมต่ออะลูมิเนียม มีความต้องการในการใช้งานสูงเป็นที่ทราบกันดีว่าเทคโนโลยีของการ Phase Array เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย มีลักษณะพิเศษเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องเล็กๆที่ปรากฏในแนวเชื่อม ซึ่งการประยุกต์ใช้ Phase Array ในการตรวจสอบแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) เป็นการตรวจสอบที่สำเร็จผลได้ด้วยดี งานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงการใช้วิธี Phase Array ตรวจสอบแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ของอะลูมิเนียม ซึ่งผลสอดคล้องกันกับ Ciorau P. (n.d.) งานวิจัยนี้นำเสนอรูปแบบของการตรวจหาสิ่งบกพร่องในแนวเชื่อม โดยภาพที่แสดงผ่านหน้าจอโดยการตรวจสอบ (Scan) ตัวอย่างชนิดชิ้นงานแตกต่างกันที่ตรวจสอบข้อบกพร่องในแนวเชื่อม รอยแตกของแนวเชื่อม โพรงอากาศในแนวเชื่อม ขนาดของการหลอมละลาย การแตกร้าวบริเวณขอบรอยเชื่อม การแตกร้าวที่ผิวหน้าของงานเชื่อม สาแตกที่ปนเปื้อน ลักษณะการซึมลึกของชิ้นงานและการแตกร้าวในแนวเชื่อม ซึ่งจะ

แสดงในรูปแบบของการตรวจสอบคือ S-Scan และ B-Scan มีผลทำนองเดียวกันกับ Lonsdale C. et al. (n.d.) กล่าวถึงการพัฒนา การติดตั้งและใช้ประโยชน์จากเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส (Phased Arrays Ultrasonic) ในการตรวจสอบและประเมินทางรถไฟ การตรวจสอบแบบอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส เป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์ สามารถใช้ได้ร่วมกับอุปกรณ์ทางไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสถูกใช้ตรวจสอบเพื่อหาความปลอดภัย ซึ่งระบบอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส มีการประยุกต์ใช้กับการผลิตอื่นๆ โดยเฉพาะการผลิตท่อที่ผ่านการเชื่อมมา งานวิจัยแสดงให้เห็นถึงการใช้อัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ตรวจสอบสิ่งเจือปนที่ผสมอยู่ในเหล็กทางรถไฟ ระบบการตรวจสอบของทางรถไฟที่ใช้อัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ถือว่าเป็นวิธีใหม่ซึ่งข้อมูลที่ได้อาจจะแม่นยำด้วยระบบคอมพิวเตอร์

จากการสำรวจเอกสารพบว่า การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 ต้องเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min หัวพินทรงกระบอก ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด (อับดุล บินระหีมและคณะ, 2551; ธงชัย เครือผือและประภาศ เมืองจันทร์บุรี, 2551) ดังนั้นในงานวิจัยจะใช้ตัวแปรเดียวกันแต่จะปรับเพิ่มที่ความเร็วรอบเป็น 1,320 และ 1,750 rpm ในการเชื่อมและสภาวะทางความร้อน (T6) การอบละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบในน้ำและตามด้วยการบ่มที่ 165 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพราะให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด (สิริพร ชันทองคำ, 2552) ส่วนการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสจะใช้การเอ็กซ์เรย์เข้ามาเปรียบเทียบ เพื่อจะได้ทราบถึงจุดบกพร่องในแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการตรวจหารอยบกพร่องโดยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสเทียบกับการเอ็กซ์เรย์ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อทิ้งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6 มีสมมติฐานงานวิจัยของสภาวะทางความร้อนก่อนและหลังงานเชื่อม จะให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลที่แตกต่างกันอีกทั้งการเกิดรอยบกพร่องที่ต่างกันด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

(1) เพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ

(2) เพื่อหารอยบกพร่อง (Defects) ของแนวเชื่อมในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ โดยการตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส (Phased Arrays Ultrasonic) เทียบกับเครื่องเอ็กซ์เรย์ (X-Ray)

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษางานวิจัยประกอบด้วย การเชื่อมเสียดทานแบบกวน และการทดสอบ การเชื่อมใช้กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir of Welding Process) โดยวัสดุที่ใช้คือ Semi-Solid Metal 356 หรือ SSM 356 (Al, Si 7%, Mg 0.35%) กัดชิ้นงานให้มีขนาด  $100 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$  วางชิ้นงานต่อชนทำราบ ยึดให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึด ใช้ Tool แบบทรงกระบอกหมุนขวา หมุนด้วยความเร็ว 1,320 และ 1,750 rpm บนชิ้นงานให้เกิดการเสียดทาน ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 160 mm/min โดยเชื่อมในสภาพของลำดับทางความร้อน ต่างๆ 4 สภาพ คือ (1) As welded (AW), (2) T6 FWS (TW), (3) FWS T6 (WT) และ (4) T6 FWS T6 (TWT) กระบวนการทางความร้อน T6 คือการอบละลายของแข็งที่อุณหภูมิ  $540^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบในน้ำและตามด้วยการบ่มที่  $165^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาค จุลภาค ทดสอบสมบัติทางกล (ความแข็งแรง) และการตรวจหาสิ่งบกพร่องในแนวเชื่อมด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสเทียบกับการเอ็กซ์เรย์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการวิจัยในครั้งนี้คาดว่าจะมีประโยชน์ต่อผู้สนใจดังนี้

(1) ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ที่ดีที่สุดสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 ซึ่งหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยจะเน้นที่ผลของกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อนและหลังการเชื่อม ต่อโครงสร้างทางมหภาค โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีที่สุด

(2) ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างทางมหภาค โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและสามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม

(3) สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องการตรวจหารอยบกพร่องในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อทิ้งของแข็งโดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6 จะทำการศึกษาในเรื่องของสถานะทางความร้อนก่อนและหลังงานเชื่อม เพื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

#### 2.1 โลหะอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็น โลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ (พูน เกตุกราย, 2523) เช่น มีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และจรวดขีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก

สัญลักษณ์อะลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials) มีตัวเลขสี่หลัก เช่น 1XX.X และ 2XX.X เป็นต้น ซึ่งมีความหมายดังต่อไปนี้

ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก ตามตารางที่ 2.1 เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอะลูมิเนียม ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

ตัวเลขตัวที่สอง เป็นสัญลักษณ์ใช้สำหรับกำกับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนผสมของโลหะ ให้แตกต่างไปจากโลหะผสมเดิม เช่น ตัวเลข 0 แสดงว่า เป็นโลหะผสมดั้งเดิม ส่วนตัวเลข 1-9 แสดงว่า เป็นโลหะที่ผสมเข้าไปเปลี่ยนแปลงจากเดิม ยกตัวอย่างเช่น หมายเลข 2024 ตัวเลขหลักที่สองคือ 0 (4.5%Cu, 1.5%Mg, 0.5%Si และ 0.1%Cr) เมื่อเทียบกับ

หมายเลข 2218 ตัวเลขหลักที่สองคือ 2 (4.0%Cu, 2.0%Ni, 1.5%Mg และ 0.2%Si) ซึ่งสังเกตได้ว่าหมายเลข 2218 มีนิกเกิล (Ni) ผสมเข้าไป

ตัวเลขตัวที่สามและสี่ เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงชนิดย่อยๆ ของโลหะที่ผสมในกลุ่มเดียวกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นหมายเลข 2014 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 14(4.4%Cu, 0.8%Si, 0.8%Mn และ 0.4%Mg) และหมายเลข 2017 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 17(4.0%Cu, 0.8%Si, 0.5%Mn, 0.5%Mg และ 0.1%Cr)

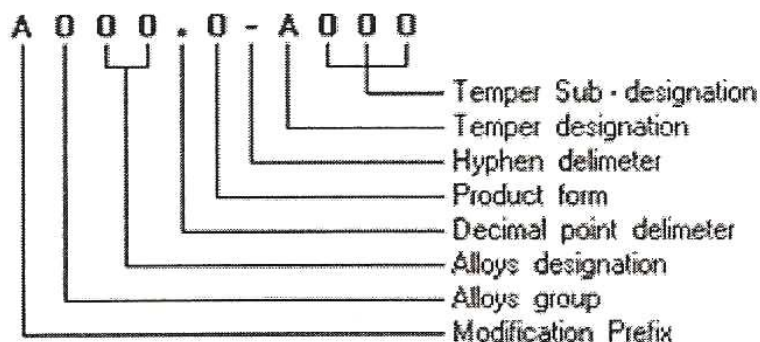
เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สาม และ หลักที่สี่จะแสดงปริมาณของ อะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ที่ปรากฏภายหลัง 99% เช่น หมายเลข 1060 และหมายเลข 1080 หมายถึง อะลูมิเนียมขึ้นรูป ที่มีอะลูมิเนียม 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสม

|       |  |
|-------|--|
| 1XX.X | อะลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%  |
| 2XX.X | ทองแดง (Copper , Cu)   |
| 3XX.X | ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu) – แมกนีเซียม (Mg)<br>ซิลิกอน (Silicon , Si) – แมกนีเซียม (Magnesium , Mg)<br>ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu) |
| 4XX.X | ซิลิกอน (Silicon , Si)   |
| 5XX.X | แมกนีเซียม (Magnesium , Mg)  |
| 7XX.X | สังกะสี (Zinc , Zn)  |
| 8XX.X | ดีบุก (Tin , Sn)   |
| 9XX.X | ธาตุอื่นๆ (Other Element)  |
| 6XX.X | ยังไม่มีใช้ (Unused Series)  |

ที่มา : วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542

American Aluminum Association ได้กำหนดมาตรฐาน และแยกประเภทอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard ได้ แสดงดังภาพที่ 2.1 ดังนี้



ภาพที่ 2.1 สัญลักษณ์อะลูมิเนียมหล่อผสม (วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542)

- A : อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสมจะแตกต่างกัน
- O : Alloy group จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ชาติหลักของ Alloys หรือ Major Alloying
- OO : Alloys designation เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่างของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลขที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ Al ที่มีผสมอยู่ เช่น 190.X เท่ากับ Al ผสมอยู่ 99.90%
- .O : ตัวเลขหลังจุดทศนิยม หมายถึง รูปแบบการผลิต หรือ Product form เป็นตัวเลขหลักเดียว คือ
- .O : เป็น Casting Specification
  - .1 : เป็น Ingot Specification
  - .2 : เป็น Ingot Specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot Specification
- A : Temper designation เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการ Heat Treatment ที่ใช้กับ Heat Treatable Alloys ดังนี้
- F : As Cast Condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อ โดยไม่ต้องใช้ กรรมวิธีใดๆ ควบคุม ภายหลังการหล่อขึ้นรูป
  - H : Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจาก ความเครียด จากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่างๆ
  - O : Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อ ที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาด รูปร่าง ให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งาน หรือเพื่อทำให้เพิ่มความเหนียว (Ductility)

W : Solution Heat Treat เป็นการอบเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็น สารละลายของแข็ง เฟสเดียวใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบด้วยตนเองได้ในบรรยากาศปกติ

T : เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี “F” , “O” และ “T” ทุกกระบวนการ สามารถหล่อด้วย แบบทราย และแบบเหล็ก

OO: Temper Sub – designation เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีทำ Temper ที่ชัดเจนโดยระบุอุณหภูมิ และ

O : ช่วงเวลาปฏิบัติ การที่แยกละเอียดไปได้อีก 10 วิธีการจาก T1 ถึง T10 และส่วนปลีกย่อยอีก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering)

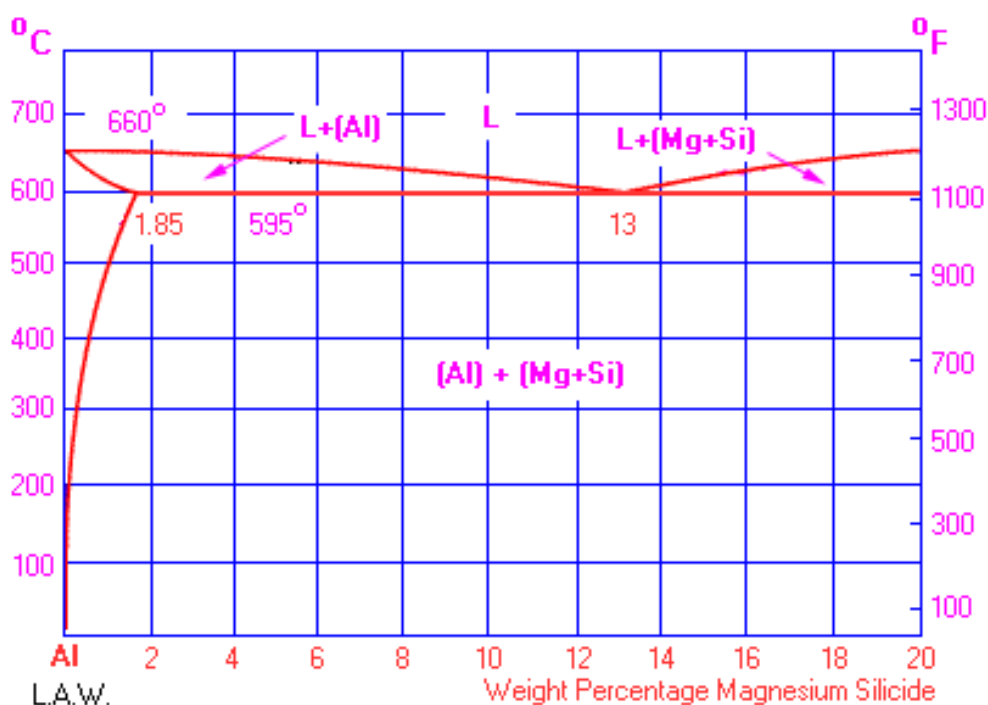
|     |  |
|-----|--|
| T1  | ปล่อยให้งานเย็นตัวลงตามปกติในบรรยากาศปกติ และบ่มธรรมชาติ (Naturally Aged) โดยธรรมชาติและสภาพงานไม่เปลี่ยนแปลง  |
| T2  | ปล่อยให้งานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ ความแข็งเพิ่มขึ้นขณะใช้งาน                     |
| T3  | นำงานไปทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) แล้วปล่อยให้งานเย็นตัวลง แล้วทำ Naturally Aged โดยทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศจะเกิดความแข็งแรง strain hardening |
| T4  | ทำ Solution Heat Treated และ Naturally Aged เพื่อให้ความแข็งแรงคงตัว   |
| T5  | ปล่อยให้งานค่อยๆ เย็นตัวลงในสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มเทียม (Artificially Aged)   |
| T6  | เป็นการทำ Solution Heat Treated , Quenching แล้วทำ Artificially Aged   |
| T7  | เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized   |
| T8  | เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged   |
| T9  | เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Artificially Aged แล้วนำมาทำ Cold Worked   |
| T10 | เป็นการให้งานเย็นตัวตามปกติ แล้วนำไปขึ้นรูป Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged   |

ที่มา : วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542

### 2.1.1 โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม (3xx.xx)

โลหะผสมอะลูมิเนียม – ซิลิกอนเป็นโลหะผสมที่มีความสามารถในการไหลดี ทำให้งานหล่อเป็นรูปพรรณได้ง่าย และมีสมบัติด้านการกัดกร่อนที่ดีเหมาะสำหรับใช้งานเชื่อมแต่ไม่เหมาะสมกับงานกลึง

จากแผนภูมิสมดุลภาคของอะลูมิเนียม – แมกนีเซียมซิลิไซด์ ในภาพที่ 2.2 โดยจะมีลักษณะเด่นชัดที่ซิลิกอนแยกตัวไม่ละลายในอะลูมิเนียม โดยเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส และมีส่วนผสมของซิลิกอน 11.6% การแยกตัวให้ปฏิกิริยายูเทคติกจากโลหะหลอมเหลว 11.6% ซิลิกอน จะให้เฟส  $\alpha$  ที่มี 1.65 % ซิลิกอน เฟส Si มีสมบัติที่แข็งและเปราะ ถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของเฟส Si ขนาดใหญ่จะมีลักษณะต่อเนื่อง มีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำและขาดสมบัติด้านความเหนียว การปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น เพิ่มอัตราการเย็นตัวภายในแบบหล่อให้สูงขึ้น เพิ่มปริมาณนิวเคลียสของการแข็งตัวเพื่อลดขนาดเกรนให้เล็กลง หรือใช้เทคนิคโมดิฟิเคชัน (Modification)



ภาพที่ 2.2 แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม – แมกนีเซียมซิลิไซด์ (อะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม (Aluminum-Silicon-Magnesium Casting), 2552)



## 2.1.2 อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356

อะลูมิเนียมหล่อผสมหมายเลข A356 เป็นโลหะผสม อะลูมิเนียม – ซิลิกอน แบบไฮโปยูเทคติกสามารถหล่อได้ดีทั้งในแบบทรายและแบบโลหะ มีความสามารถในการไหลตัวได้ดีและการหดตัวน้อยมาก มีความแตกต่างจากอะลูมิเนียมหล่อหมายเลข 356 ตรงที่มีปริมาณเหล็กที่ลดลง ซึ่งมีผลทำให้สมบัติการต้านแรงดึงสูงขึ้นและมีความเหนียวมากขึ้น การยึดตัวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้สูง ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356 เป็น Al, 7%Si, 0.35%Mg, 0.20%Fe, 0.20%Cu, 0.10%Mn, 0.10%Zn และ 0.230%Ti แสดงดังภาพที่ 2.2 การเติมแมกนีเซียมลงไปเล็กน้อย ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยการฟอร์มเฟส  $Mg_2Si$  ในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ชนิด T6 คือ การนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำ จากนั้นจึงนำไปทำการบ่มเทียม

โลหะผสมอะลูมิเนียม – ซิลิกอน ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้นได้ด้วยวิธีการอบชุบความร้อน แต่เมื่อเติมแมกนีเซียม หรือทองแดง จะเกิดการรวมตัวให้เฟสกึ่งโลหะ เช่น  $Mg_2Al_3$  หรือ  $CuAl_2$  ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T5 ที่ประกอบด้วยกระบวนการบ่มเทียม หรือ T6 ที่ประกอบด้วย 3 กระบวนการ ดังนี้

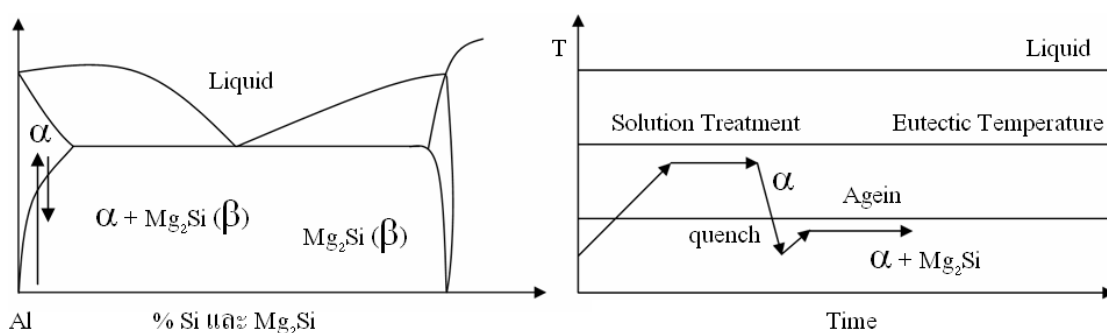
1. การอบละลาย (Solution Treatment) เป็นการอบเพื่อละลายเฟสที่สอง เช่น  $Mg_2Si$  หรือ  $CuAl_2$  ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งและมีการแพร่อย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน โดยอุณหภูมิและเวลาของการอบละลายขึ้นอยู่กับหมายเลขและขนาดของโลหะผสมเป็นหลัก

2. การชุบ (Quenching) เพื่อให้ธาตุ Mg และ Cu ที่ละลายเป็นสารละลายของแข็งในกระบวนการแรก ยังคงอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำโลหะผสมจากกระบวนการที่ 1. มาทำให้เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปสารละลายของแข็งที่มีสถานะอิ่มตัวยังขาด และพร้อมที่จะตกตะกอนออกมาเมื่อนำมาผ่านกระบวนการขั้นที่ 3.

3. การบ่ม (Aging) กระบวนการนี้ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสกึ่งโลหะที่มีความละเอียดมาก และช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ การบ่มอาจทำได้โดยการวางชิ้นงานไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เรียกว่า การบ่มธรรมชาติ (Natural Aging) หรือนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เรียกว่า การบ่มเทียม (Artificial Aging) โดยอุณหภูมิของการบ่มที่ขึ้นอยู่กับหมายเลขของโลหะผสม และเวลาของการบ่มที่ให้ถึงความแข็งแรงสูงสุดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการบ่ม

## 2.2 ขั้นตอนการบ่ม (Age Hardening)

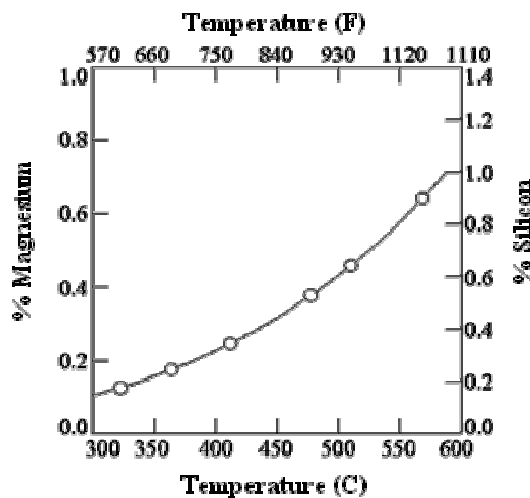
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนชนิดเกรด A356 ถูกนำมาเพิ่มความแข็งแรงจากสภาวะหล่อด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (Age Hardening) โดยทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กของเฟสที่สอง (Secondary Phase) นั่นคือ อนุภาค  $Mg_2Si$  กระจายตัวอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ ( $\alpha$ -Al) โดยอนุภาค  $Mg_2Si$  ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำหน้าที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ด้วยกลไก Cutting และ Bowing ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งขั้นตอนการบ่มประกอบด้วยกระบวนการอบชุบ 3 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการบ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356 (Meyers C.W, 1985)

### 2.2.1 ขั้นตอน Solution Treatment

โลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด A356 จะมีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญคือ อะลูมิเนียม ซิลิกอน และ แมกนีเซียม ซึ่งผลจากอัตราการเย็นตัวขึ้นทดสอบในสภาวะหล่อจะเกิดการ Segregation ของแมกนีเซียมและซิลิกอนอยู่ในรูปของเฟส  $Mg_2Si$  ที่มีขนาดใหญ่และซิลิกอนที่เหลือจะอยู่ในรูปเฟส Eutectic Silicon เมื่อขึ้นทดสอบผ่านการทำ Solution Heat Treatment ด้วยการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูงพบว่าการละลายของเฟส  $Mg_2Si$  ทำให้ซิลิกอนและแมกนีเซียมละลายเข้าสู่ในโครงสร้างอะลูมิเนียมเนื่องจากความสามารถในการละลายของซิลิกอนและอะลูมิเนียมสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์กับ  
อุณหภูมิตั้งแต่ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส (Meyers C.W, 1985)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356 จากเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมซิลิไซด์พบว่าอุณหภูมิในการแข็งตัวของเฟสแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งเรียกว่าการเกิด Segregation จากเฟสไดอะแกรมพบว่าเมื่อนำอะลูมิเนียมหลอมเหลวผ่านอุณหภูมิ 615 °C จะเริ่มเกิดเฟสของแข็ง ซึ่งเรียกว่าเฟส  $\alpha$ -Al ซึ่งจะเริ่มแข็งตัวก่อนและมีลักษณะรูปร่างคล้ายกิ่งไม้ ที่เรียกว่า Dendrite โดยเฟส  $\alpha$ -Al ที่เกิดขึ้นมีปริมาณซิลิกอนและแมกนีเซียมที่สามารถละลายได้น้อยมาก เมื่อเฟส  $\alpha$ -Al เติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวที่มีปริมาณของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ตามระหว่างแขน Dendrite ทำให้ชิ้นทดสอบจะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว จนกระทั่งเมื่อชิ้นทดสอบเย็นตัวผ่านอุณหภูมิ 577 °C จะมีเฟส Eutectic Silicon เกิดขึ้นและเป็นบริเวณที่เย็นตัวสุดท้าย ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีภายในโครงสร้างของชิ้นงาน

โดยขั้นตอน Solution Treatment คือขั้นตอนการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างผลึกเกิดการแพร่ของอะตอมจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำได้รวดเร็วขึ้นโดยการให้ความร้อนกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อ เกรด A356 จนกระทั่งอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับ 520-550 °C เป็นระยะเวลา 4-12 ชั่วโมง ทำให้อะตอมของตัวถูกละลายเกิดการละลาย อาทิ เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียมละลายเข้าสู่ตัวทำละลายคือเฟส  $\alpha$ -Al เพื่อทำให้นเนื้อเมตริกซ์มีความเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลาย โดยอาศัยการ

แพร่ของอะตอมในโครงสร้างซึ่งเป็นการแพร่แบบแทนที่ จากเฟสไดอะแกรมพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานให้สูงขึ้น ส่งผลทำให้อะตอมต่าง ๆ ภายในโครงสร้างมีพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดโอกาสในการเกิดช่องว่างภายในโครงสร้างของผลึกซึ่งเรียกว่า วาเคนซี (Vacancy) ได้มากขึ้น โดยวาเคนซีที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมสามารถแพร่แบบแทนที่เข้าสู่เนื้อเมตริกซ์ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

### 2.2.2 ขั้นตอน Quenching

โดยการชุบชิ้นทดสอบที่ผ่านขั้นตอน Solution Treatment ที่มีอุณหภูมิในช่วง 25-60 °C ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่ละลายเข้าสู่เฟส  $\alpha$ -Al ในระหว่างขั้นตอน Solution Treatment ไม่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะแพร่ออกจากเฟส  $\alpha$ -Al จึงตกค้างภายในเนื้อเมตริกซ์  $\alpha$ -Al ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super Saturated Solid-Solution)

### 2.2.3 ขั้นตอน Aging

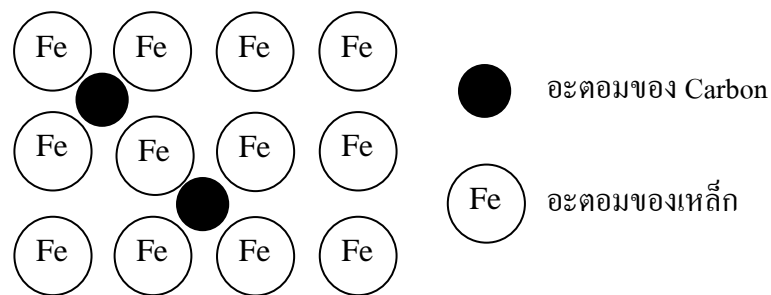
โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ 120-200 °C เป็นระยะเวลา 3-24 ชั่วโมง หลังจากผ่านขั้นตอน Quenching ในขั้นตอน Aging จะเกิดการแพร่ของอะตอมซิลิกอนและแมกนีเซียมออกจากเฟส  $\alpha$ -Al ไปรวมตัวกันและเกิดเป็นกลุ่มอนุภาคของเฟสใหม่ที่เรียกว่าอนุภาค  $Mg_2Si$  และอนุภาคที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรและกระจายตัวในเนื้อเมตริกซ์ โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในขั้นตอน Aging มีผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่จะฟอร์มตัวกันเป็นอนุภาค  $Mg_2Si$  โดยกลไกการเกิดเฟสใหม่เป็นไปตามปฏิกิริยา Precipitation Hardening ดังนี้ GP Zone  $\longrightarrow$   $\beta''$  Phase  $\longrightarrow$   $\beta'$  Phase  $\longrightarrow$   $\beta$  (Stable phase)

## 2.3 กลไกการแพร่ของอะตอม (Diffusion Mechanism)

การแพร่ของอะตอมหมายถึงการเคลื่อนที่ของอะตอมจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion) และ การแพร่แบบแทนที่ (Substitution Diffusion)

### 2.3.1 การแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion)

การแพร่ของอะตอมต่างชนิดกันที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีขนาดของอะตอมตัวถูกละลาย มีขนาดเล็กกว่าอะตอมของตัวทำละลายมาก ๆ อาทิเช่น อะตอมของคาร์บอนซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอะตอมเหล็กมาก ทำให้อะตอมของคาร์บอนสามารถแทรกตัวในโครงสร้างผลึกได้ ดังนั้นการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัวจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัว  
(แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, 2544)

### 2.3.2 การแพร่แบบแทนที่ (Substitution Diffusion)

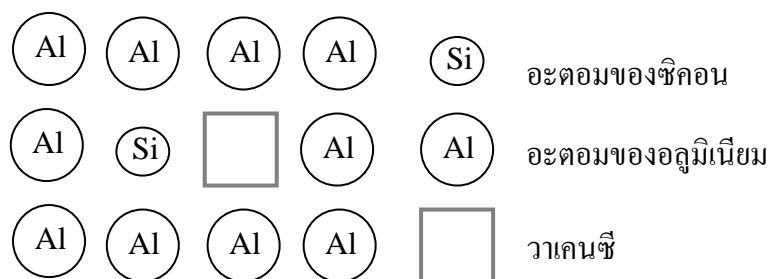
ในกรณีของอะตอมของตัวทำละลายและตัวถูกละลายมีขนาดใกล้เคียงกัน การแพร่ที่เกิดขึ้นจะเป็นการแพร่แบบแทนที่ กล่าวคือการแพร่จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อจะต้องมีวาแคนซี คือ ตำแหน่งช่องว่างในโครงสร้างผลึก (Vacancy) ในตำแหน่งข้างเคียง อะตอมจึงสามารถแพร่ได้ ดังนั้นความเร็วในการแพร่ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างภายในโครงสร้างผลึก จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนวาแคนซีที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมต่าง ๆ ภายในโครงสร้างมีพลังงานเพิ่มขึ้น สามารถเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยว และหลุดเป็นอะตอมอิสระ ทำให้เกิดวาแคนซีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการแพร่แบบแทนที่ ณ อุณหภูมิสูงจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการแพร่แบบแทนที่ ณ อุณหภูมิต่ำ ตัวแปรที่มีผลต่อการแพร่ได้แก่

1. อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อะตอมต่าง ๆ มีพลังงานภายในสูงขึ้น ทำให้เกิดการสั่นมากขึ้น เมื่ออะตอมใด ๆ ที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวจะหลุดออกจากโครงสร้างผลึก ทำให้เกิดเป็นวาแคนซี และอะตอมต่าง ๆ เกิดการแพร่ได้ง่าย

2. ขนาดของอะตอมของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ในกรณีที่มีขนาดแตกต่างกันมาก เช่น อะตอมของเหล็กและคาร์บอนจะมีลักษณะการแพร่แบบแทรก แต่ในกรณีที่อะตอมทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันจะมีลักษณะการแพร่แบบแทนที่
3. ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusivity:  $D_0$ ) โดยวัสดุแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกและพลังงานยึดเหนี่ยวอะตอมที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการแพร่ของอะตอม โดยพบว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของอะตอมสูงกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งหมายถึงอะตอมของธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าสามารถแพร่ได้เร็วกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง
4. จุดบกพร่องในโครงสร้างผลึก ซึ่งจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมีหลายลักษณะอาทิ เช่น วาเคนซี ดิสโลเคชัน และบริเวณขอบเกรน ซึ่งบริเวณเหล่านี้อะตอมต่างๆ สามารถแพร่ได้ง่าย

### 2.3.3 การแพร่แบบแทนที่ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356

เมื่อพิจารณาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356 พบว่าขนาดอะตอมของอะลูมิเนียม ซิลิกอนและแมกนีเซียมมีขนาดใกล้เคียงกันคือ 0.142 nm 0.118 nm และ 0.160 nm ตามลำดับ ดังนั้นในขั้นตอน Solution Treatment พบว่าเมื่ออุณหภูมิขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้นทำให้อะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึก มีพลังงานสูงขึ้นและเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมโดยอาศัยการแพร่แบบแทนที่แสดงดังในภาพที่ 2.6 เนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกของธาตุต่าง ๆ มีขนาดไม่เท่ากัน และความเร็วในการแพร่ของอะตอมแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของการแพร่เฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดเช่น  $D_{\alpha-Al}$  และ  $D_{\text{eutectic silicon}}$  โดยทั่วไปแล้วอะตอมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ที่สูงกว่าอะตอมที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า ดังนั้นจะมีการแพร่ของอะตอมของอะลูมิเนียมในเฟส  $\alpha$  และอะตอมซิลิกอนในเฟส Eutectic Silicon จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของอะตอมธาตุนั้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำเพื่อต้องการลดระดับพลังงานของระบบ



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการแพร่ของอะตอมซิลิกอนภายในเฟส  $\alpha - Al$  เป็นแบบแทนที่  
(แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, 2544)

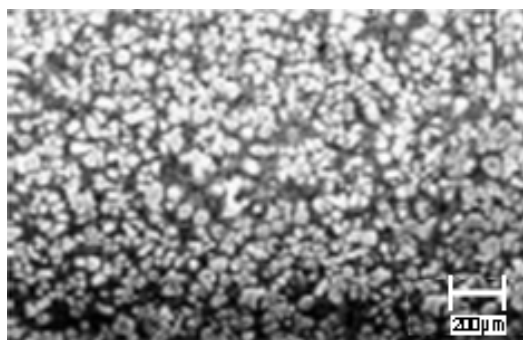
## 2.4 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2549) กล่าวว่า การขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วนโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-Dendritic Grain) หรือบางที่เรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) โดยที่เกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ในน้ำโลหะทำให้อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง มีความเหนียวมากกว่าน้ำโลหะหลายเท่า และการที่โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลมทำให้มีความเหนียวน้อยกว่าโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ แสดงดังภาพที่ 2.7 และ 2.8

การผลิตโลหะกึ่งของแข็งมีหลายวิธีโดยการสร้าง Solid Particles ในปริมาณที่พอเหมาะโดย เจษฎา วรรณสินธุ์ (2549) กล่าวว่าขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ (Forced Convection) เพื่อให้มีการแตกตัวของเดนไดรต์ หรือมีการเกิด Nucleation มากขึ้นทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะนั้น ทำได้หลายวิธี ตั้งแต่การใช้วัตถุแข็งรูปร่างเหมือนไม้พายกวนน้ำโลหะ (Kang C.G. et al., 2007) กล่าวว่าการใช้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic หรือ EM) บางส่วนที่เริ่มแข็งตัวถูกกระตุ้นด้วยการกวนโครงสร้างของเดนไดรต์จะแตกตัวโดยการกวนการเทน้ำโลหะเพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ ใช้การสั่นโดยแรงอัลตราโซนิก (Ultrasonic Vibration) การควบคุมการแข็งตัวกระแสไฟฟ้าและเวลาที่เหมาะสมทำให้โครงสร้างเป็นก้อนกลม นอกจากการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวแล้ว การใส่สารที่เพิ่มการเกิด Nucleation การอบโลหะที่อุณหภูมิในช่วงกึ่งแข็งเป็นเวลานานทำให้เกิดโลหะกึ่งของแข็งได้เช่นกัน



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างแบบเดนไดรต์ (M.F. Zah and D.Eireiner, 2004)



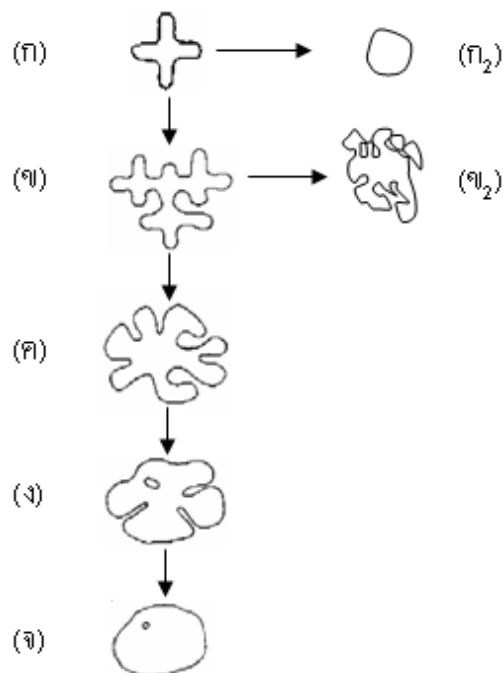
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างแบบก้อนกลม (Munich et al., 2006)

#### 2.4.1 กลไกการผลิตโลหะแข็งด้วยกรรมวิธี Rheocasting

การเกิดของอนุภาคของแข็ง (Nafisi S. and Gomashchi R., 2006) กล่าวว่า ส่วนเล็กๆ ที่มีรูปร่างแบบ Equiaxed มากมาย ซึ่งอาจจะเกิดจากกระบวนการ Nucleation and Growth หรือกระบวนการแตกตัวของเดนไดรต์ (Dendrite Fragmentation) หรือเป็นผลจากทั้งสองกระบวนการผสมกันในขณะที่โลหะแข็งตัว อนุภาคของแข็งเหล่านี้ก็จะเติบโตด้วยการกระจายของอะตอม หรือ Coarsening ทำให้รูปร่างแบบ Equiaxed ของเกรน กลายเป็นเกรนแบบก้อนกลม

อนุภาคของแข็งที่เกิดเริ่มแรกนั้นมีขนาดเล็กมากและมีปริมาณมาก เกรนแบบก้อนกลมจะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ตามกลไกวิวัฒนาการอนุภาคของแข็ง ดังภาพที่ 2.9 จาก (ก) ไป (ก<sub>2</sub>) แต่หากขนาดอนุภาคใหญ่เกินไปการเกิดเกรนแบบก้อนกลมก็จะเป็นไปตามเส้นทางวิวัฒนาการ จาก (ก) ไป (จ) และหากสภาวะไม่ได้ตามที่จำเป็นก็จะไม่เกิดเกรนแบบก้อนกลม ดังแสดงในเส้นทางวิวัฒนาการ จาก (ข) ไป (ข<sub>2</sub>)





ภาพที่ 2.9 วิวัฒนาการและการเติบโตอนุภาคของแข็ง (Solid Particles)

(Flemings M.C. and Johnson W.L. et al., 2002)

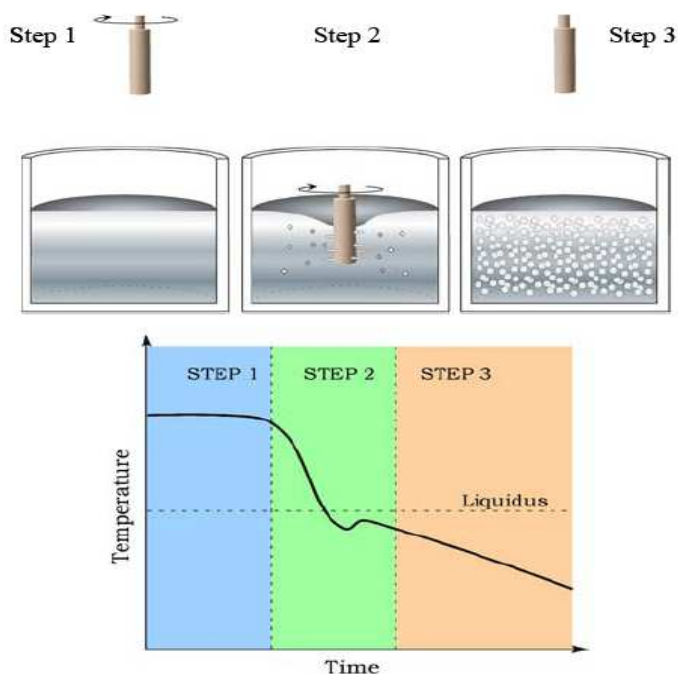
#### 2.4.2 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการหล่อแบบรีโอคาสติ้ง (Rheocasting)

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (SSM) ได้มีการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ก็ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายทำให้ข้อได้เปรียบและประโยชน์ของการหล่อ SSM ไม่ได้นำมาใช้อย่างเต็มที่ การพัฒนากระบวนการผลิตแบบ Rheocasting เป็นการลดต้นทุนในการผลิต SSM และเพื่อให้เทคโนโลยีการหล่อ SSM ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อ Die Casting ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้นอกจากการเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ โดยการลดต้นทุนการผลิตได้มาจากปัจจัยต่างๆ เช่นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle Time) การลดของเสีย (Reject) การเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในการอบชุบ เป็นต้น

ในปัจจุบันมีหลากหลายกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างสุดท้ายมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เช่น กรรมวิธีการกวนทางกล (Mechanical Stirring) การกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Stirring) การสั่นด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic Vibrations) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวล้วนต้องอาศัยตัวกลางเพื่อให้เกิดการไหลวน (Agitation) ทั้งสิ้น โดยในกรรมวิธี

การกวนทางกลจะใช้ใบพัดหรือแท่งทรงกระบอกเพื่อให้เกิดการไหลวน กรรมวิธีการกวนด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้าอาศัยแรงทางไฟฟ้าเป็นตัวพาให้เกิดการไหลวนของของเหลว ส่วนการสั่นก็เป็นวิธีการทำให้เกิดการไหลวนด้วยเช่นกัน แต่กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น ราคาที่สูง และการเกิดไมโครเซกกริเกรชันเนื่องจากการกวนที่สัดส่วนของแข็งสูง ๆ หากมองย้อนไปดูหลักการเกิดโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เป็นที่ชัดเจนว่าหากต้องการให้เกิดการแตกตัวของกิ่งเดนไดรท์จะต้องทำให้เกิดการไหลวนในช่วงก่อนที่จะมีการแข็งตัวเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่กิ่งของเดนไดรท์มีขนาดเล็กมากและอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าสูง

ด้วยหลักการดังกล่าว ทำให้เมื่อไม่นานมานี้ (Martinez R.A., 2004) และ (Flemings M.C., 1974) ได้แสดงให้เห็นว่าหากจุ่มและหมุนแท่งโลหะเย็นลงในน้ำโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว โดยใช้เวลาในการหมุนแท่งโลหะเพียงเล็กน้อยจนเริ่มมีสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงยกแท่งโลหะขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.10 จะพบว่าโครงสร้างของโลหะภายหลังการเย็นตัวจะมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม โดยพวกเขาเรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า Semi-Solid Rheocasting: SSR



ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-solid Rheocasting (SSR)

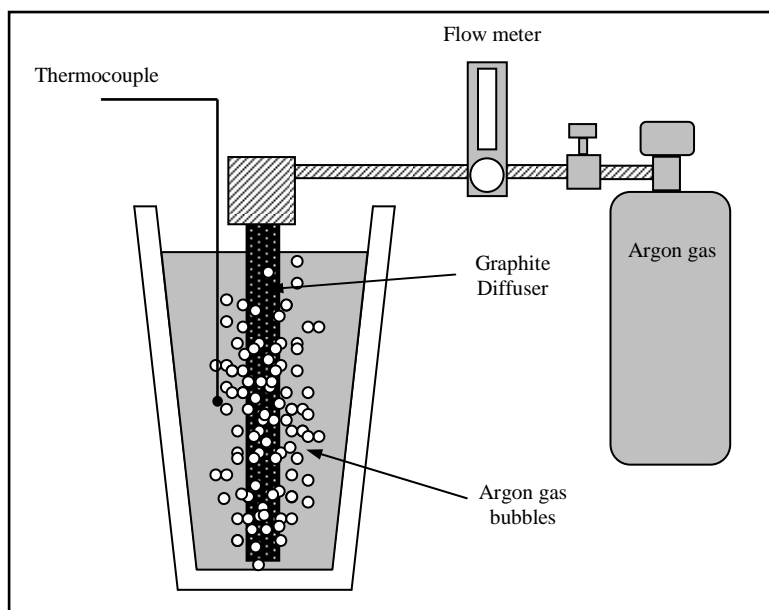
(Martinez R.A., 2004)

ซึ่งต่อมา (Martinez R.A., 2004) ได้แสดงให้เห็นในวิทยานิพนธ์ปริญญาเอกของเขาว่าการสร้างโลหะกึ่งของแข็งสามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพจากการกวนน้ำโลหะเฉพาะจุด และเกิดจากการระบายความร้อนจากน้ำโลหะเฉพาะจุดอย่างรวดเร็ว (Rapid Localized Heat Extraction)

แม้ว่ากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีดังกล่าวจะสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ประสบปัญหาหลายประการในขั้นตอนของการผลิต เช่น การต่อระบบให้ความเย็นด้วยน้ำและระบบเซ็นเซอร์เข้ากับแท่งที่หมุนซึ่งเป็นวิธีที่สลับซับซ้อนและยากต่อการติดตั้ง นอกจากนี้ระหว่างที่วัตถุหมุนจะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นได้ในขั้นตอนนี้

### 2.4.3 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว

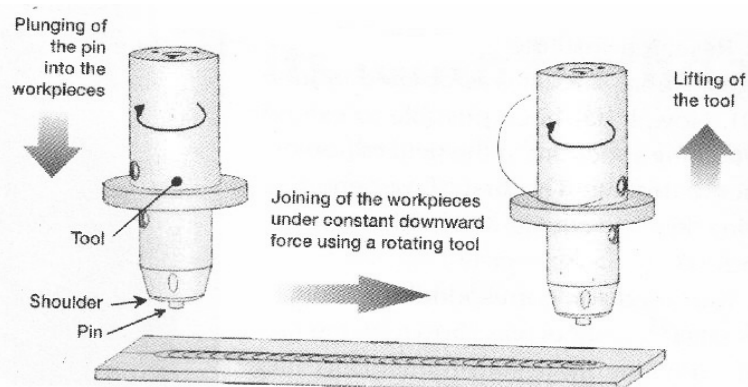
กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค Gas Induced Semi-Solid (GISS) (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2549) กล่าวว่า GISS เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเหนือผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal Grain) คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการเช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเหนียวไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ แสดงดังในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง  
ด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2549)

## 2.5 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

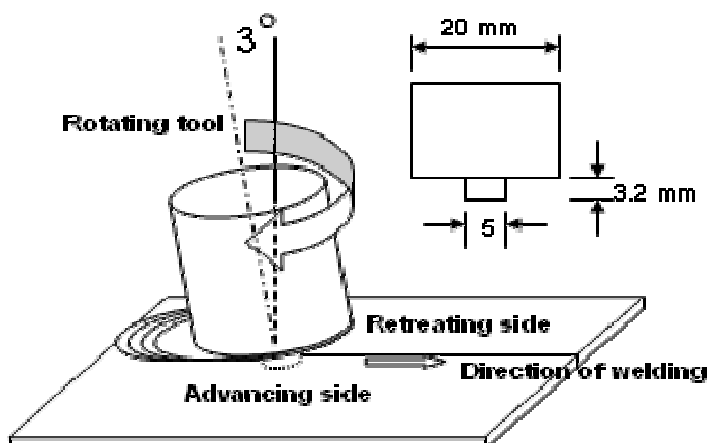
เป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง โดยโลหะยึดติดกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง (ประภาศ เมืองจันทร์บุรี, 2550) กล่าวว่าโลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เนื่องจากที่อุณหภูมิหลอมละลายเมื่อโลหะแข็งตัว จะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลข้างต้น จึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The Welding Institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยที่ป้าสัมผัสแผ่นงานและหมุนด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนดพร้อมกับความเร็วในการเชื่อม และแรงกดในขณะที่เชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมคือ แรงกด (Down force) ความเร็วรอบของ Tool ความเร็วในการเชื่อมและมุมเอียงของ Tool (Tilt Angle) แสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Zah M.F. and Eireiner B. et al., 2004)

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างแข็งตัวของเหลวไปเป็นของแข็งและปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสติง เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง นอกจากนี้โลหะบางประเภทจะไม่สามารถเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนเข้า จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 1XXX 2XXX 5XXX 6XXX และ 7XXX รวมถึงอะลูมิเนียมผสม Al-Si-Li

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Elangovan K. and Balasubramanian V., 2007) กล่าวว่าเครื่องมือถูกออกแบบเป็นพิเศษ โดยบ่าของเครื่องมือหมุนสัมผัสแผ่นงานที่ทำการเชื่อม ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้ชิ้นงานอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ทำให้อนุภาคอะลูมิเนียมผสมที่ได้ ถูกกวนจนแตกหักเป็นอนุภาคที่ละเอียดในบริเวณที่ถูกกวน โดยมีพารามิเตอร์ในการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม แรงกดและมุมเอียงของเครื่องมือ ในการเชื่อมเครื่องมือหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ในการออกแบบเครื่องมือเส้นผ่าศูนย์กลางของบ่า  $\varnothing 20$  มิลลิเมตร ตัวกวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $\varnothing 5$  มิลลิเมตร ความยาว 3.2 มิลลิเมตร ความยาวของตัวกวน จะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแผ่นงาน ในการเชื่อมชิ้นงานจะถูกยึดด้วยอุปกรณ์จับยึด มุมของเครื่องมือเอียง  $3^\circ$  องศา จากแนวตั้งและหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แสดงดังภาพที่ 2.13



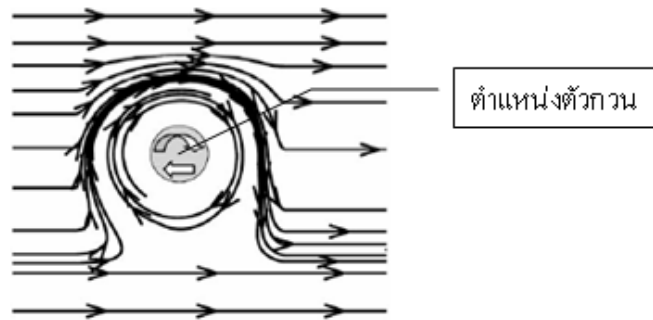
ภาพที่ 2.13 การหมุนของเครื่องมือบนชิ้นงาน ด้วยการเลียดทานแบบกวน

(Elangovan K. and Balasubramanian V., 2007)

การเชื่อมเลียดทานแบบกวน ทิศทางและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ (Kim Y.G. et al., 2005) เมื่อปาสัมผัสแผ่นงาน เกิดการเลียดทานก่อให้เกิดความร้อนและเนื้อโลหะอยู่ในสภาวะอ่อนตัว การไหลวนของโลหะกึ่งของแข็งรอบตัวกวน ขณะที่เครื่องมือหมุนด้วยความเร็วรอบ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการเชื่อม ทำให้เนื้อโลหะประสานติดกันด้วยการกวน แสดงดังภาพที่ 2.12

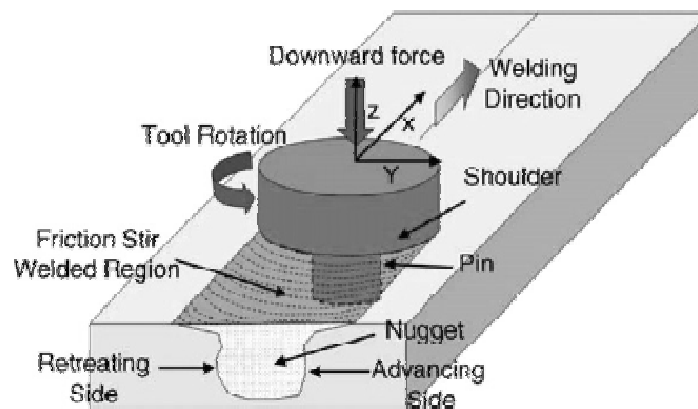
### 2.5.1 องค์ประกอบในการเชื่อมด้วยการเลียดทานแบบกวน

ปัจจัย กระบวนการ และผลของการเชื่อมด้วยการเลียดทานแบบกวน (Santella M.L. et al., 2005) กล่าวว่า ปัจจัยนำเข้า ประกอบด้วยความเร็วรอบของ Tool และความเร็วในการเชื่อม กระบวนการ อุณหภูมิและแรงกดของ Tool แรงบิดและแรงในแนวแกน  $F_x$  และ  $F_y$  แรงกดใน  $F_z$  ในการเชื่อมแบบต่อเนื่องแรงกดใน  $F_z$  ลดลง ภายใต้กระบวนการเชื่อมที่ถูกควบคุมในทิศทาง การเชื่อมเลียดทานแบบกวน และจตุรวมของแรงทั้งสามแกน แสดงดังภาพที่ 2.14 ผลที่ได้ สมบัติทางกล คือความแข็งแรง ความแข็งของรอยเชื่อม บริเวณอิทธิพลความร้อนและเนื้อเชื่อม โครงสร้างทางโลหะวิทยา ด้าน Advancing Side และ Retreating Side



ภาพที่ 2.14 ทิศทางและการกวนของตัวกวน (Santella M.L. et al., 2005)

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน กำหนดจุดรวมและทิศทางของแรงบนเครื่องมือ เป็นการเพิ่ม Advancing และ Retreating Side ของการเชื่อมที่เป็นผลรวมการหมุนของเครื่องมือและการเคลื่อนที่สวนทางกับการเชื่อม สมบัติของวัสดุและความเค้นตกค้างในการเชื่อมมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยบนชิ้นงานด้าน Advancing Side และ Retreating Side ของการเชื่อม แสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) (Rajiv S.M. and Murray W.M. et al., 2007)

## 2.5.2 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน

ความร้อนจากการเสียดทานทางกล และข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม และแรงกดก่อให้เกิดความร้อน และข้อบกพร่องในงานเชื่อม (Kim Y.G. et al., 2005) กล่าวไว้ว่า ผลจากความร้อนที่มากหรือน้อยเกินไป

และจากความผิดปกติของการกวนที่ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนและส่วนที่ถูกกวน เพราะผลของข้อบกพร่องทำให้เกิดช่องว่างในรอยเชื่อม อย่างไรก็ตาม ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างความร้อนที่ไม่เพียงพอ และความผิดปกติในการกวน ดังนั้น ความแตกต่างของข้อบกพร่องขึ้นอยู่กับสถานะของการเสียดทาน มวลของครีปที่เกิดขึ้นมาก เกิดจากความร้อนที่มากเกินไป ช่องว่างที่เกิดขึ้นความร้อนที่ไม่สมดุล จากการกวนที่ผิดปกติ ข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อย แรงกดของเครื่องมือสามารถทำให้ช่องว่างลดลงโดยการเพิ่มแรงกด

สมการความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังนี้

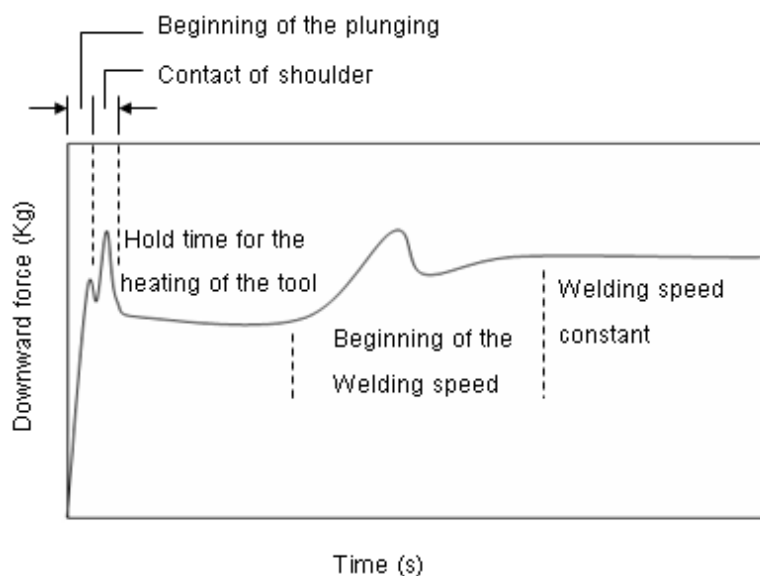
$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\alpha \mu P N R^3}{V} \quad (2.1)$$

|          |   |
|----------|---|
| $Q$      | คือ ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ (J/mm) |
| $\mu$    | คือ สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล       |
| $\alpha$ | คือ ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายความร้อน      |
| $P$      | คือ แรงกด (N)                             |
| $N$      | คือ ความเร็วรอบ (rpm)                     |
| $R$      | คือ รัศมีของบ่า (mm)                      |
| $V$      | คือ ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)          |

### 2.5.3 แรงกดของเครื่องมือ

แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วย Load Cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Munich, 2006) กล่าวว่ามีแรงเพิ่มขึ้นสามช่วง ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมจนบ่าสัมผัสแผ่นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อม เป็นแรงกดที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุม ดังภาพที่ 2.16





ภาพที่ 2.16 ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อม FSW ในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม (Munich, 2006)

## 2.6 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ (X-Ray)

เป็นการตรวจสอบหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม การตรวจสอบโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสีซึ่งมักจะเรียกว่า "เอ็กซ์เรย์" โดยที่วิธีตรวจถ่ายภาพด้วยรังสี มีข้อเด่นก็คือ สามารถตรวจสอบโครงสร้างทั้งภายนอกและในชิ้นงาน อันไม่ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายกับชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบแต่ประการใด การตรวจสอบโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสี ถูกประยุกต์นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทางอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นการสร้างประกอบโครงสร้าง วินิจฉัยเพื่อการซ่อมบำรุง ส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น อากาศยาน ยานพาหนะทั้งทางบกและทางน้ำ เพื่อเป็นการประกันคุณภาพ และเพิ่มความเชื่อมั่น ความปลอดภัยต่อสาธารณชนอีกด้วย หลักการทำงานโดยสังเขปของการถ่ายภาพด้วยรังสี อาศัยหลักการเดียวกับการฉายรังสีอวัยวะต่าง ๆ ทางการแพทย์ เพียงแต่เปลี่ยนจากการฉายรังสีที่อวัยวะ มาฉายรังสีที่ชิ้นงานวัสดุภัณฑ์แทน ปริมาณรังสีที่ส่งผ่านชิ้นงานไปได้ จะถูกส่งไปบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มฟิล์มขาว-ดำ ซึ่งเคลือบสารไวแสงเอาไว้ โดยที่แผ่นฟิล์มจะบรรจุอยู่ในซองทึบแสง (แสงไม่-สามารถผ่านทะลุได้) เหตุนี้เพราะต้องการให้ฟิล์มได้รับรังสีเพียงอย่างเดียว เมื่อนำฟิล์ม ไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มในห้องมืด จะปรากฏภาพบนแผ่นฟิล์มแบบเนกาทีฟ (Negative) หรือเป็นภาพในฟิล์มเป็นสีตรงกันข้ามกับวัตถุจริง ผลที่ได้จากฟิล์ม จะถูกนำไปวินิจฉัยพอจะสรุปได้ว่า พื้นที่ของเนื้อวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก ๆ รังสีจะถูกบันทึกลงบนฟิล์มน้อย เมื่อนำ

ฟิล์มไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม จะเห็นเป็นภาพขาว หรือฟิล์มมีลักษณะใส ๆ ในทางกลับกันหาก รังสีฉายผ่านส่วนบาง ๆ รังสีจะถูกเก็บบันทึกบนฟิล์ม เป็นจำนวนที่มากกว่าจึงทำให้ฟิล์มดำกว่า ขณะเดียวกันข้อเสียของการถ่ายภาพรังสี คืออันตรายจากรังสีที่ใช้ (การตรวจสอบโดยวิธีการ ถ่ายภาพด้วยรังสี, 2552) แสดงดังภาพที่ 2.17



(ก) ชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบ

(ข) ฟิล์มภาพถ่ายทางรังสี

ภาพที่ 2.17 ลักษณะการถ่ายภาพรังสี (การตรวจสอบโดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสี, 2552)

## 2.7 การตรวจสอบโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic Testing)

เป็นการตรวจสอบหารอยบกพร่องภายในชิ้นงาน โดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงผ่านเข้าไปยังชิ้นงานทดสอบ เมื่อคลื่นเสียงกระทบกับสิ่งกีดขวาง จะเกิดการตรวจวัดสัญญาณเสียงที่สะท้อนกลับมา ทำให้สามารถตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องได้ ซึ่งลักษณะของหัวที่ใช้ในการตรวจสอบก็จะมีหลายแบบ เช่น หัวตรง หัวมุม หัวตรวจสอบTR เป็นต้น เครื่องแปลงความถี่หรือ กระแสความถี่ที่เหนือเสียงสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน คือ ตัวกำเนิดและตัวรับสัญญาณของคลื่นความถี่สูง หรือตัวส่งถ่ายและตัวรับสัญญาณ



ภาพที่ 2.18 ลักษณะเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ตรวจสอบงานเชื่อม  
(An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology, 2552)

### 2.7.1 ระบบการเรียงเฟสคืออะไร

หัวตรวจแบบเรียงเฟส (Phased Array Probes) แบ่งแยกได้ตามลักษณะของการทำงาน สามารถใช้ได้สำหรับการสัมผัสบนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยตรงหรือเป็นแนวองศา การส่งผ่านคลื่นความถี่มีช่วงการส่งตั้งแต่ 2 MHz ถึง 10 MHz แสดงดังภาพที่ 2.19 ระบบการเรียงเฟส (Phased Array System) ประกอบไปด้วย เครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส หัวตรวจสอบและสายเคเบิลนำส่งสัญญาณ ซึ่งแตกต่างกับเครื่องตรวจข้อบกพร่องแบบทั่วไป หัวตรวจสอบของวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสจะมีผลึกเรียงตัวกันภายในหัวตรวจสอบ ทำให้คลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้ามายังผลึกและส่งถ่ายออกไปด้วยความเร็ว สามารถสร้างภาพจำลองรอยตำหนิได้ ดังนั้นการตรวจจับของข้อบกพร่องมีความสามารถเพิ่มมากขึ้น



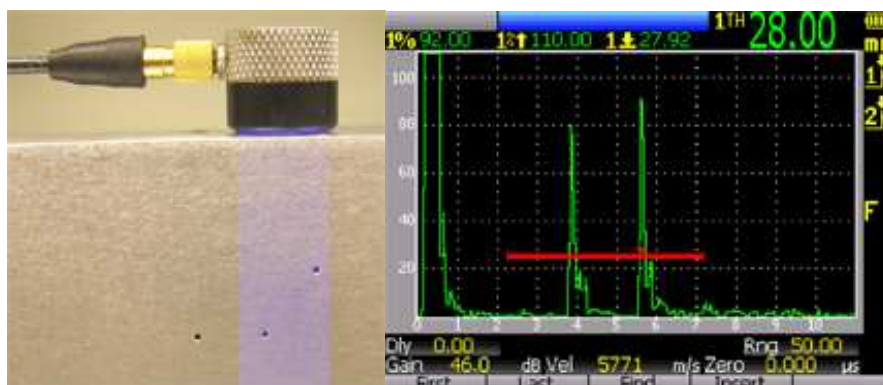
ภาพที่ 2.19 การประกอบหัวตรวจแบบเรียงเฟส  
(An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology, 2552)

## 2.7.2 รูปแบบการมองเห็นภาพ

ในการค้นหาข้อบกพร่องและการประยุกต์ใช้กับความหนาของชิ้นงาน การทดสอบด้วยคลื่นเสียง ข้อมูลจะขึ้นอยู่กับเวลาและช่วงกว้างของคลื่น ข้อมูลสามารถดำเนินการในรูปแบบของคลื่น RF รูปแบบของคลื่นและข้อมูลแสดงผลมาจากรูปแบบของการตรวจจับข้อบกพร่อง เช่น A-Scan, B-Scan, C-Scan, และ S-Scan

### (1) A-Scan

A-Scan เป็นการแสดงผลที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง สำหรับหาตำแหน่งในเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาชนิด ขนาดและตำแหน่งของตำหนิได้ A-Scan จะแสดงผลระหว่างแกนนอน (Time) กับแกนตั้ง (Amplitude) โดยที่แกนนอนแสดงถึงเวลาที่ล่าช้า และแกนตั้งแสดงถึงความแรงของคลื่นสะท้อนจากตำหนิ การหาขนาดของตำหนิโดยประมาณกระทำได้โดยการเปรียบเทียบความสูงเอคโคในแนวนอน เช่น การค้นหาข้อบกพร่องแสดงภายใต้การสะท้อนกลับของคลื่นเสียงจาก 2 รูเจาะในเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2.20 เป็นคลื่นเสียงสำหรับการติดต่อตัวแปรสัญญาณ การสะท้อนกลับแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างเป็นสัดส่วนของความลึกรูเจาะ



ภาพที่ 2.20 ลักษณะรูปร่างคลื่นเสียง (ซ้าย) ภาพสะท้อนการกวาดภาพคลื่นเสียงตรง (ขวา)

(An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology, 2552)

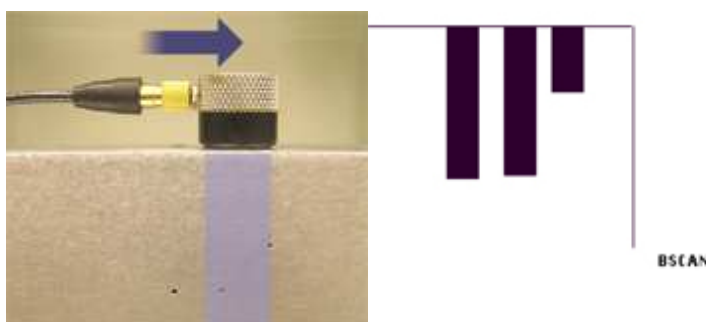
คลื่นเสียงทำมุม จะส่งคลื่นเสียงที่เป็นมุมองศา กระทำกับแนวเส้นตั้ง อิทธิพลมุมแพร่กระจายคลื่นเสียงจะมีสาเหตุมาจากขนาดของคลื่นเสียง ไปถึงการเพิ่มขึ้นของระยะห่างพื้นที่ หรือข้อจำกัดของการเอียงมุมและการอยู่นิ่งซึ่งมีผลต่อการมองเห็น ตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 2.21 เป็นการตรวจสอบของข้อบกพร่องของรูเจาะ 2 รู ทำมุม 45°



ภาพที่ 2.21 ลักษณะรูปร่างคลื่นเสียง (ซ้าย) ภาพสะท้อนการกวาดภาพคลื่นเสียงทำมุม (ขวา)  
(An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology, 2552)

## (2) B-Scan

B-Scan เป็นการแสดงผลระหว่างแกนของเวลากับแกนของระยะทางที่ตั้งฉากกัน เวลาเป็นเวลาดำหลังซึ่งแสดงถึงความลึกของตำหนิ ในขณะที่อีกแกนหนึ่งแสดงถึงระยะทางที่หัวตรวจสอบเคลื่อนไหวที่ตามความยาวผิวหน้าของชิ้นงาน ความแรงของเอคโค ไม่สามารถวัดได้โดยตรงเหมือนกับ A-Scan การแสดงผลของ B-Scan เหมือนกับการแสดงภาพหน้าตัดของชิ้นงานจะเห็นรูปทรงทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงาน Indication จากการสะท้อนของผิวหน้ารอยต่อหรือตำหนิภายในชิ้นงานยังแสดงถึงตำแหน่ง ทิศทางและความลึกอีกด้วย เช่น รูเจาะในชิ้นงานทดสอบส่วนลึกสองส่วนและส่วนที่ตื้นกว่าหนึ่งส่วน ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของรูเจาะในชิ้นงานทดสอบดังแสดงในภาพที่ 2.22 โดยการค้นหาข้อบกพร่องจะใช้การเคลื่อนที่ของหัวตรวจในแนวขวางของชิ้นงานทดสอบ

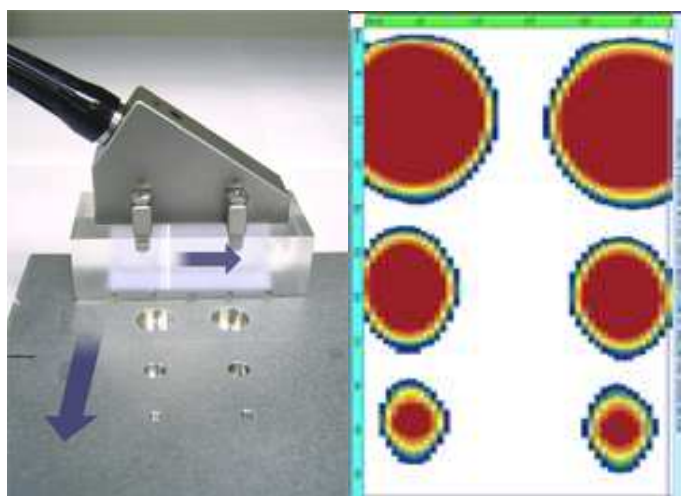


ภาพที่ 2.22 ลักษณะรูปร่างคลื่นเสียง (ซ้าย) ภาพสะท้อนการกวาดภาพคลื่นเสียงซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของรูเจาะ (ขวา)

(An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology, 2552)

### (3) C-Scan

C-Scan การแสดงภาพแบบนี้เหมือนกับการมองดูในลักษณะภาพด้านบน จะมีการบันทึกภาพในแนวระนาบ แสดงพื้นที่ของตำหนิ (ขนาด) และตำแหน่งของตำหนิด้านความลึกของตำหนิไม่สามารถวัดได้ จอภาพ จะเห็นหัวตรวจสอบเคลื่อนที่อยู่เหนือผิวหน้าของชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดและจำนวนรูเจาะที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.23 โดยการค้นหาจะใช้ การเคลื่อนที่ของหัวตรวจบนชิ้นงานทดสอบ

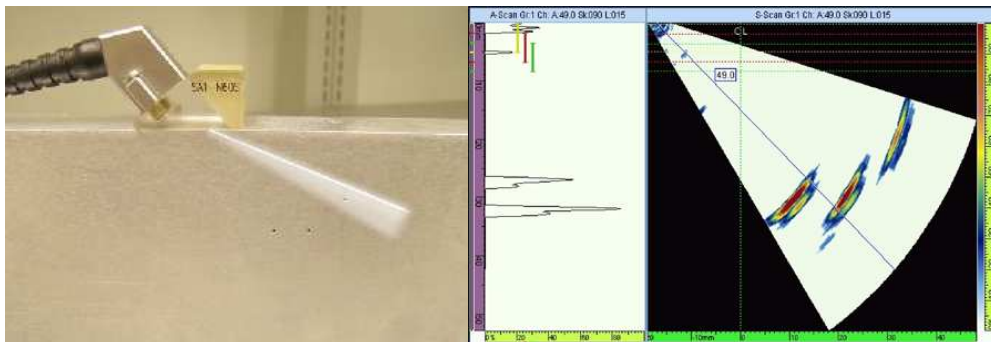


ภาพที่ 2.23 ลักษณะรูปร่างสำแสงคลื่นเสียงและการเคลื่อนที่ (ซ้าย) ภาพการเรียงเฟสของ C-Scans และตำแหน่งของรูเจาะ (ขวา)

(An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology, 2552)

### (4) S-Scan

S-Scan เป็นการตรวจหารอยบกพร่องที่ใช้ในวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ซึ่งลักษณะของหัวตรวจสอบของวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสจะมีผลึกเรียงตัวกันภายในหัวตรวจสอบ ทำให้คลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้ามายังผลึกและส่งถ่ายออกไปด้วยความเร็ว สามารถสร้างภาพจำลองรอยตำหนิได้ เช่น ชิ้นงานที่มีความลึกไม่เท่ากันดังแสดงในภาพที่ 2.24 โดยการค้นหาจะใช้การกวาดของคลื่นเสียงของหัวตรวจบนชิ้นงานทดสอบ



ภาพที่ 2.24 ลักษณะรูปร่างลำแสงคลื่นเสียงและการเคลื่อนที่ (ซ้าย) ภาพสะท้อนการเรียงเฟส (ขวา)  
(An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology, 2552)

## 2.8 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ ลักษณะ และขนาดของเกรน ที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อม รวมทั้งบริเวณเขต อิทธิพลของความร้อน (TMAZ) Retreating Side และ Advancing Side ใช้ร่วมกับการตรวจสอบด้วยสายตา ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และจุลภาค โดยเตรียมงานทดสอบกัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลาย Keller's Reagent และนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยามีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะหลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ดังนี้

1. ตรวจสอบความสมบูรณ์ของงานเชื่อม
2. การตรวจสอบการกระจายตัวและลักษณะของเกรน
3. ตรวจสอบโครงสร้างบริเวณที่ถูกกวน เขตอิทธิพลความร้อน และเนื้อโลหะ

เดิม

## 2.9 การทดสอบแรงดึง

เป็นการทดสอบสมบัติทางกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงของงานเชื่อม (Strength of Weld) โดยการทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อม ใช้ชิ้นทดสอบแบบลดขนาดตามมาตรฐาน ASTM-E8 เพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่รอยต่อของโลหะชิ้นงาน ชิ้นทดสอบเตรียมจากแผ่นงาน

เชื่อมต่อชน นำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบแรงดึง โดยตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม นำไปทดสอบแรงดึงที่ อุณหภูมิห้องความเร็วในการดึง  $1.67 \times 10^{-2}$  mm/s

## 2.10 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

เป็นการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล Montgomery D.C. (2005) กล่าวว่า เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ บันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย คือสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistic) เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

### 2.10.1 การกำหนดขนาดตัวอย่าง

การกำหนดขนาดตัวอย่างว่าจะมีจำนวนเท่าไรที่สามารถเป็นตัวแทนประชากรได้เพียงพอและเหมาะสมที่จะทำให้การวิจัยมีประสิทธิภาพไม่สิ้นเปลืองงบประมาณ เวลา และกำลังคน โดยการกำหนดขนาดตัวอย่าง ดังนี้

โดยการกำหนดค่าดังนี้

1. Type I Error (Alpha;  $\alpha$ ) = 0.05
2. Power ( $1 - \beta$ ) = 0.95
3. Number of Center Point = 0
4. Estimate  $\sigma$
5. Minimum Effect (D)

การประมาณค่า  $\sigma$  จากผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง ค่าที่มีการแนะนำให้ใช้ หรือ การศึกษาเบื้องต้นของการทดลองนี้ ในกรณีนี้ไม่มีข้อมูลของการทดลองอื่น หรือข้อมูลอื่นๆ มาใช้ในการประมาณค่า ที่ต้องการจึงต้องมีการศึกษาเบื้องต้นเพื่อประมาณค่า  $\sigma$  โดยการออกแบบการทดลอง Factorial Design หาค่า  $\sigma$  จากสมการ (2.2)



$$\sigma = \sqrt{MS_{Error}} \quad (2.2)$$

### 2.10.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดอยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล คือ ในแต่ละซ้ำของการทดลองประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด  $a \cdot b$  การทดลอง โดยปกติ จะมีจำนวนทำซ้ำทั้งหมด  $n$  ครั้ง กำหนดให้  $y_{ijk}$  คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, a$ ) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, b$ ) สำหรับซ้ำที่  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง  $a \cdot b \cdot n$  ครั้ง เลือกมาอย่างสุ่ม เป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) แบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) สมการ (2.3)

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\mu$  หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด  $\tau_i$  หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่  $i$  ของแถวของปัจจัย A;  $\beta_j$  หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่  $j$  ของคอลัมน์ของปัจจัย B;  $(\tau\beta)_{ij}$  หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง  $\tau_i$  และ  $\beta_j$  และ  $\varepsilon_{ijk}$  หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่มสมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดดังนั้น  $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$  และ  $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$  ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัวและกำหนดว่า  $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$  เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนทำซ้ำ  $n$  ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ  $a \cdot b \cdot n$

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจากความเร็วรอบ (A) และความเร็วในการเชื่อม (B) มีความสำคัญเท่ากัน

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็วรอบ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ At Least One}$$

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็วในการเชื่อม

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \quad \text{At Least One}$$

ผลของอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมมีนัยสำคัญหรือไม่

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{For All } i, j$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{At Least One}$$

การทดสอบสมมติฐานเหล่านี้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัย

### 2.10.3 สมมติฐานในการทดลอง

เป็นการทดสอบตัวแปรที่ถูกกำหนดในการทดลองว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองหรือไม่โดยตั้งสมมติฐานหลักและความสัมพันธ์ของตัวแปร ตรวจสอบผลด้วยค่าทางสถิติดังนี้

#### 1. พิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วรอบ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 \quad \text{สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2 \quad \text{สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน}$$

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 \quad \text{สำหรับทุกระดับอิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \quad \text{สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมแตกต่างกัน}$$

#### 2. พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วในการเชื่อม

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{for all } i, j \text{ ทุกระดับ } i, j \text{ ไม่มีอิทธิพลของ Interaction } (i = 1,2; j = 1,2,3)$$

$$H_1 : \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ มีบาง } i, j \text{ มีอิทธิพลของ Interaction } (i = 1,2; j = 1,2,3)$$

### 2.10.4 แบบจำลองการถดถอย

การสร้างแบบจำลองการถดถอยกับตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ซึ่งจะสร้างแบบจำลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปร คือ ความเร็วรอบของเครื่องมือ ที่ระดับ

1,320 และ 1,750 rpm ผลของงานเชื่อม SSM A356 ค่าความแข็งแรง มีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเชื่อม ที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min จึงได้สร้างแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ของงานเชื่อมฯ ด้วยความเร็วรอบของเครื่องมือ กับความเร็วในการเชื่อม และใช้แบบจำลองในการพยากรณ์ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วในการเชื่อม แบบจำลองที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (2.4)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (2.4)$$

สมการทั่วไปของ Regression Factorial Design

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.5)$$

### 2.10.5 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ

เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองในการตรวจสอบการใช้งานของแบบจำลอง โดยสมมติว่าค่าความผิดพลาดในแบบจำลอง  $\varepsilon_1$  มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma^2$  ซึ่งเขียนย่อได้เป็น  $\varepsilon$ -NID  $(0, \sigma^2)$  ผลก็คือข้อมูลที่เก็บมาได้  $y$  จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$  ความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma^2$  การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยคือการทดสอบเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ  $y$  และเซตย่อยของตัวแปรถดถอย  $x_1, x_2, \dots, x_k$  หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 = \beta_1 \neq 0 \text{ for at Least One } j$$

การปฏิเสธ  $H_0$  จากสมมติฐาน บอกให้ทราบว่า อย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย  $x_1, x_2, \dots, x_k$  หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง การทดสอบทำได้จากการแบ่งผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง ( $SS_T$ ) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลรวมกำลังสองที่เกิดจากแบบจำลอง และผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด จำนวนได้จากสมการ (2.6)

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (2.6)$$

ถ้าสมมติฐานศูนย์  $H_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_K = 0$  เป็นจริงแล้ว  $SS_R / \sigma^2$  จะมีการกระจายแบบ  $X^2_k$  โดยที่ระดับขั้นความเสรีของ  $X^2$  เท่ากับจำนวนของตัวแปรการถดถอยในแบบจำลองในทำนองเดียวกันเราสามารถแสดงได้ว่า  $SS_R / \sigma^2$  มีการกระจายแบบ  $X^2_{n-k-1}$  และ  $SS_E$  และ  $SS_R$  จะเป็นอิสระ วิธีการทดสอบ  $H_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_K = 0$  จากสมการ (2.7)

$$F_0 = \frac{SS_R / K}{SS_E / (n - k - 1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (2.7)$$

ปฏิเสธ  $H_0$  ก็ต่อเมื่อ  $F_0$  มีค่ามากกว่า  $F_{\alpha, k, n-k-1}$  ในทางกลับกันอาจจะใช้วิธีการ P-value เพื่อทดสอบสมมติฐานและจะปฏิเสธ  $H_0$  ต่อเมื่อ P-value สำหรับค่าสถิติ  $F_0$  น้อยกว่า  $\alpha$  ตารางทั่วไปในการวิเคราะห์ความแปรปรวนถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอย

| Source of Variation | Sum of Squares | Degrees of Freedom | Mean Square | $F_0$         |
|---------------------|----------------|--------------------|-------------|---------------|
| Regression          | $SS_R$         | $K$                | $MS_R$      | $MS_R / MS_E$ |
| Error or Residual   | $SS_E$         | $n - k - 1$        | $MS_E$      |               |
| Total               | $SS_T$         | $n - 1$            |             |               |

การคำนวณทำได้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ แสดงให้เห็นส่วนหนึ่งของผลการวิเคราะห์จาก Statgraphics คือการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง การทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอยของการทดสอบสมมติฐานที่ว่า

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1 \neq 0 \text{ for at Least One } j$$

ค่า P-value สำหรับค่าสถิติ F (สมการ 2.7) จะสรุปได้ว่าอย่างน้อยที่สุดหนึ่งในสองของตัวแปรความเร็วรอบของ Tool และอัตราความเร็วในการเชื่อมจะมีสัมประสิทธิ์การถดถอยไม่เป็นศูนย์

ค่า  $R^2$  คำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2.8)$$

$R^2$  เป็นตัววัดของจำนวนที่ลดลงในความแปรผันของ  $Y$  เมื่อใช้ตัวถดถอย  $X_1, X_2, \dots, X_K$  ในแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ค่าที่  $R^2$  มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากว่าการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้  $R^2$  เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไบนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าแบบจำลองที่มีค่า  $R^2$  มาก อาจจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าผลตอบก็ได้

เนื่องจาก  $R^2$  มีค่าเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อเราเพิ่มพจน์ต่าง ๆ เข้าไปในแบบจำลอง ทำให้ค่าสถิติ  $R^2$  แบบปรับแล้วมากกว่าเขียนเป็นสมการได้เป็นสมการ (2.9)

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{SS_E / (n - 1)} = 1 - \left( \frac{n - 1}{n - p} \right) (1 - R^2) \quad (2.9)$$

ตามปกติสถิติ  $R^2$  แบบปรับแล้วจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริง ถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลอง ค่าของ  $R^2_{adj}$  จะมีค่าลดลงเสมอ เมื่อ  $R^2$  และ  $R^2_{adj}$  แตกต่างกันมาก จะหมายความว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่าพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญได้ถูกเติมลงไปแบบจำลอง

### 2.10.6 การเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparisons)

ในการทดสอบ F-Test จะเห็นว่าเป็นการทดสอบโดยรวม (Over All Test) ซึ่งเป็นการทดสอบว่าจะมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significant) ก็จะบอกเพียงว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกันแต่จะไม่บอกว่าเป็นคู่ใด ซึ่งเราจะต้องทำ

การทดสอบหลังการวิเคราะห์ โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison) ที่นี้จะอธิบายการเปรียบเทียบพหุคูณเฉพาะมีเงื่อนไขความเท่ากันของความแปรปรวนและบางวิธีที่นิยมใช้กัน

(1) Least - Significant Different (LSD)

วิธีการเปรียบเทียบพหุคูณแบบ LSD หรือ Fisher's Least – Significant Different เป็นเทคนิคที่ R.A. Fisher ได้พัฒนาขึ้นหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประชากรครั้งละหลายคู่ โดยใช้สูตร

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (2.10)$$

ค่า  $MS_E$  ได้จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวน One Way ANOVA โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) คำนวณค่า LSD
- 2) คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย  $\bar{X}_i - \bar{X}_j$
- 3) นำค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$  เปรียบเทียบกับ ค่า LSD
  - 3.1 ถ้าค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > \text{ค่า LSD}$  แสดงว่า  $\mu_i \neq \mu_j$
  - 3.2 ถ้าค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq \text{ค่า LSD}$  แสดงว่า  $\mu_i = \mu_j$

(2) Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

เป็นวิธีการเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่ว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาดเท่ากัน ( $n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_K = n$ ) โดยมีสูตรดังนี้

$$HSD = q(\alpha, df_w, K) \sqrt{\frac{MS_w}{n}} \quad (2.11)$$

q หาได้จากตารางค่าวิกฤติของ Studentized Rough Statistic โดย  $df_w$  มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งมีค่า N-K วิธี HSD มีขั้นตอนดังนี้

- 1) คำนวณค่า HSD
- 2) คำนวณค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$
- 3) เปรียบเทียบค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$  กับค่า HSD โดย
  - 3.1 ถ้า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > \text{HSD}$  แสดงว่า  $\mu_i \neq \mu_j$

$$3.2 \text{ ถ้า } |\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq \text{HSD} \text{ แสดงว่า } \mu_i = \mu_j$$

(3) The Sheffe's Post hoc Comparison (Sheffe')

การเปรียบเทียบพหุคูณ โดยวิธี Sheffe' นั้นสามารถใช้ได้กับกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ โดยใช้สูตร

$$CV_d = \sqrt{(K-1)(F^*)(MS_w)\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)} \quad (2.12)$$

$F^*$  คือ ค่า F ที่เปิดจากตารางค่าวิกฤตของ F โดยมี  $df_1 = K - 1, df_L = N - K$   
 $MS_w$  คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณความแปรปรวนภายในกลุ่มซึ่งได้จากตารางการวิเคราะห์ ความแปรปรวน ขั้นตอนการเปรียบเทียบพหุคูณ โดยวิธีของ Sheff' มีดังนี้

- 1) คำนวณค่า  $CV_d$
- 2) คำนวณค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$
- 3) เปรียบเทียบ  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$  กับค่า  $CV_d$  โดย

$$3.1 \text{ ถ้า } |\bar{X}_i - \bar{X}_j| \geq CV_d \text{ แสดงว่า } \mu_i \neq \mu_j$$

$$3.2 \text{ ถ้า } |\bar{X}_i - \bar{X}_j| < CV_d \text{ แสดงว่า } \mu_i = \mu_j$$

### 2.10.7 การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม

ในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองกลุ่มนั้น ข้อมูลที่รวบรวมได้จากกลุ่มตัวอย่าง แต่ละกลุ่มนั้นเป็นข้อมูลในมาตราอันดับหรือมาตราอันดับส่วนโดยนำค่าเฉลี่ย (X) ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มนั้นมาเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่การสรุปว่า ค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มนั้นแตกต่างกันหรือไม่ แบ่งได้ 2 กรณี คือ

(1) กลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ ( $n \geq 30$ ) ทดสอบโดย Z-test

(2) กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ( $n < 30$ ) ทดสอบโดย t- test

การเลือกใช้ Z-test และ t- test

1) กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาดใหญ่ ( $n_1$  และ  $n_2$  แต่ละกลุ่มมากกว่าหรือเท่ากับ 30) ใช้ Z-test

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติอาจไม่สามารถหา  $\sigma^2$  ได้ ซึ่งสามารถใช้  $S_1^2, S_2^2$  แทนได้

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.14)$$

2) กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาดเล็ก ( $n$  ในแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 30) ให้ใช้ t-test โดยต้องคำนึงถึงองศาอิสระ (Degree of Freedom: df) ในการใช้ t-test นี้มี 2 กรณี คือ

2.1 ไม่ทราบความแปรปรวนของประชากร ทั้ง 2 กลุ่ม และตั้งข้อตกลง (Assume) ว่า ความแปรปรวนของประชากรทั้งสองกลุ่มเท่ากัน ( $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ )

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left[ \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]}} \quad (2.15)$$

$$df = n_1 + n_2 - 2$$

2.2 ไม่ทราบความแปรปรวนของประชากรทั้ง 2 กลุ่ม และตกลงว่า (Assume) ความแปรปรวนของประชากรทั้งสองกลุ่มไม่เท่ากัน ( $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ )

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.16)$$

$$df = \frac{\left[ \frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right]^2}{\frac{\left[ \frac{S_1^2}{n_1} \right]^2}{n_1 - 1} + \frac{\left[ \frac{S_2^2}{n_2} \right]^2}{n_2 - 1}} \quad (2.17)$$

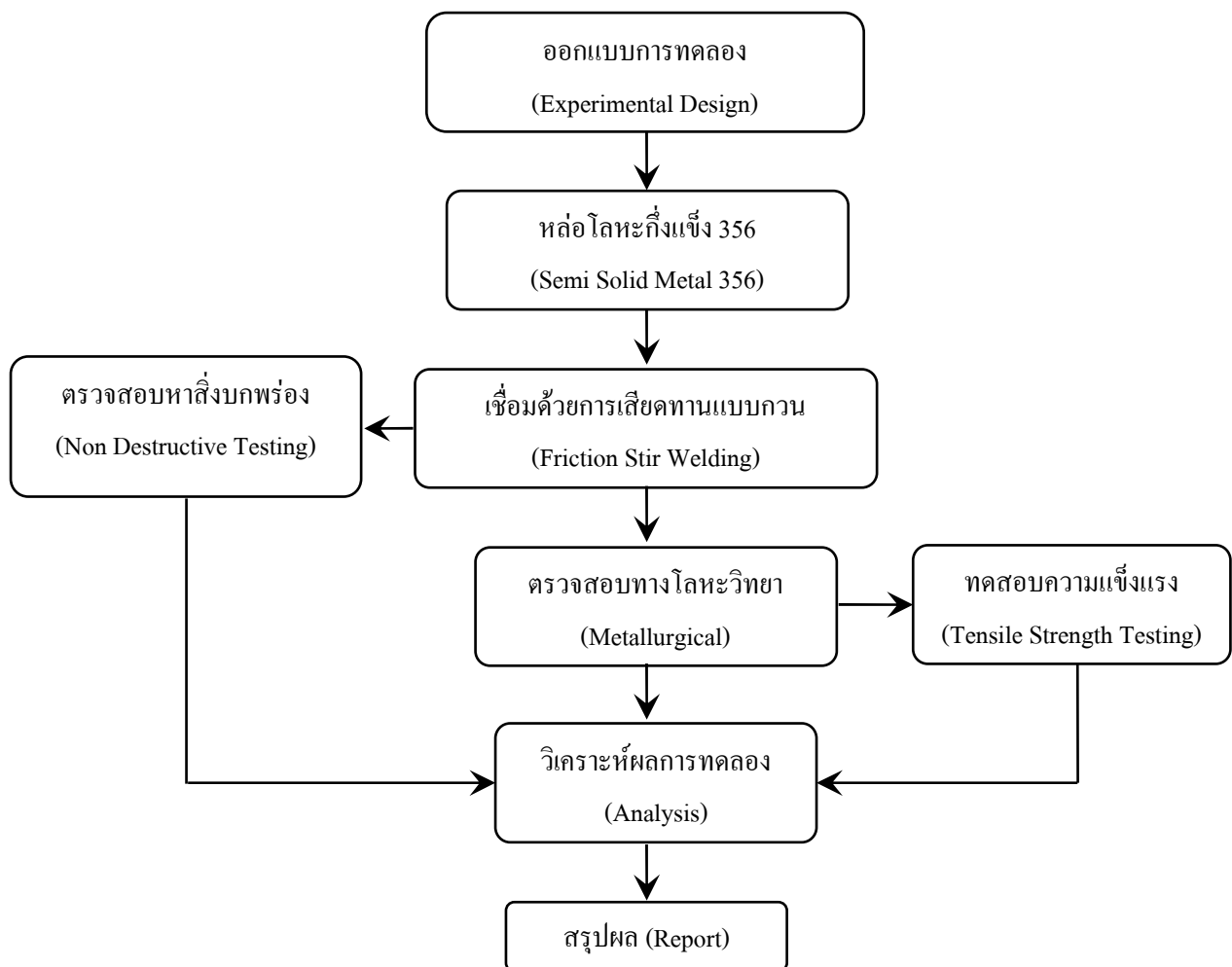


### บทที่ 3

#### วิธีการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อหารอยบกพร่อง (Defects) ของแนวเชื่อมในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ โดยการตรวจสอบแบบ Phased Arrays Ultrasonic เทียบกับการ X-Ray และเพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ มีวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

##### 3.1 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.1 วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

อะลูมิเนียมหล่อผสมแบบกึ่งของแข็งเกรด 356 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเป็น วัสดุอะลูมิเนียมผสม เกรด 356 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่ง ของแข็งด้วยเทคนิค Gas induced Semi-Solid (GISS) ที่คล้ายกับการหล่อแบบ Rheocasting ซึ่ง เทคนิค GISS จะทำการหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 700 °C เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 620 °C จะใช้แก๊ส กล้วย่ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน) เพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ เกิดการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์ เป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปเทลง ใน Mold แบบทรงกลมแล้วอัด (Squeeze) ดังภาพที่ 3.2 (ก) และ (ข) ที่ความดันไม่น้อยกว่า 2,000 Psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นกลมที่มีความหนาประมาณ 6-8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.3 (ก), (ข) และ (ค) เป็นโครงสร้างที่ได้จากการ หล่อกึ่งของแข็งซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (ก้อนสีขาว) เป็นเฟสอะลูมิเนียม ( $\alpha$ ) และบริเวณเฟสยูเทคติก ประกอบด้วยเฟสอะลูมิเนียมผสมกับเฟสซิลิกอน (สีดำสลับขาว)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม 356 (W.T.%)

| วัสดุ | Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Zn   | Ti   | Cr   | Ni   | Al   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 356   | 7.74 | 0.57 | 0.05 | 0.06 | 0.32 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | Bal. |

Bal. คือ สัดส่วนของธาตุอะลูมิเนียมที่นอกเหนือจากส่วนผสมทางเคมีดังตาราง

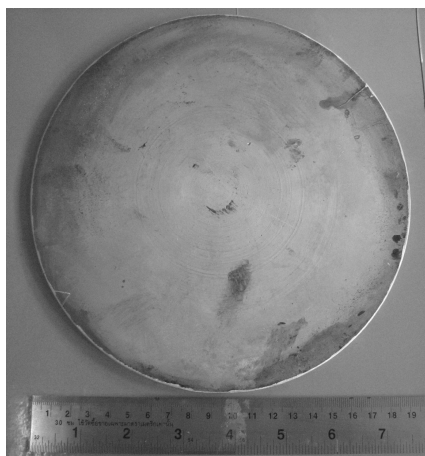


(ก)

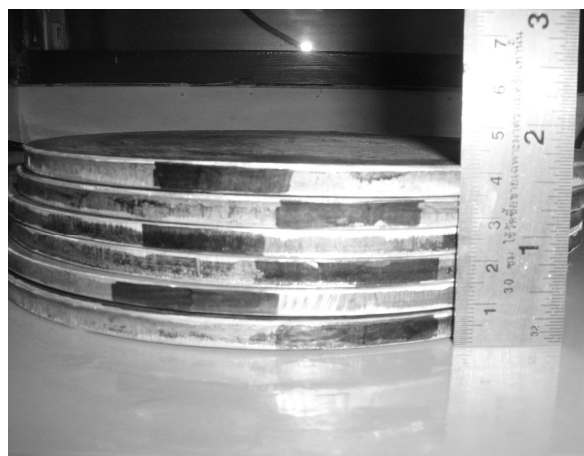


(ข)

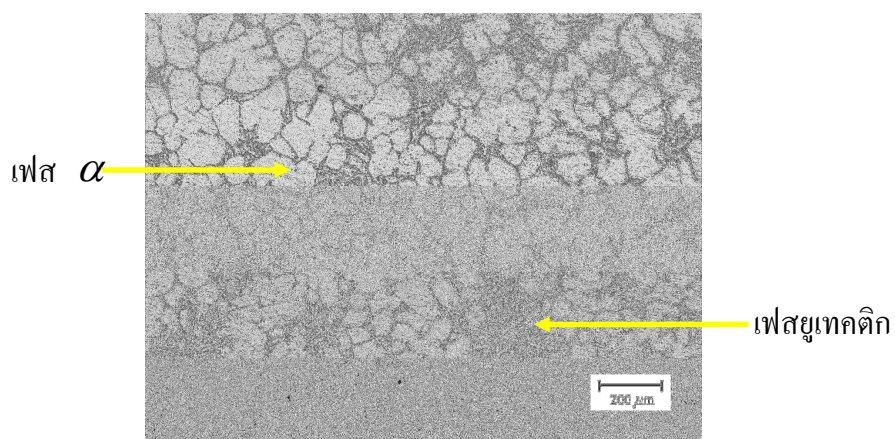
ภาพที่ 3.2 Mold ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3.3 ชั้นทดสอบของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

- (1) เครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ใช้ในการกัดอะลูมิเนียม 356 ให้มีขนาดตามแบบในการทดลองและใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องกัดแนวตั้ง

(2) เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น UE-712A ใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดความกว้างและความยาวใกล้เคียงขนาดจริงภายหลังจากการกัดให้ได้ขนาดความหนา ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

(3) เตาเผาอุณหภูมิต่ำ ยี่ห้อ LINDBERG/BLUE ใช้ในการทำกระบวนการทางความร้อน T6 ทั้งก่อนและหลังงานเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ

(4) เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสีกลาด ใช้ในการตัดผิวหน้าชิ้นงานก่อนการนำชิ้นงานไปดูภาพโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในภาพที่ 3.7

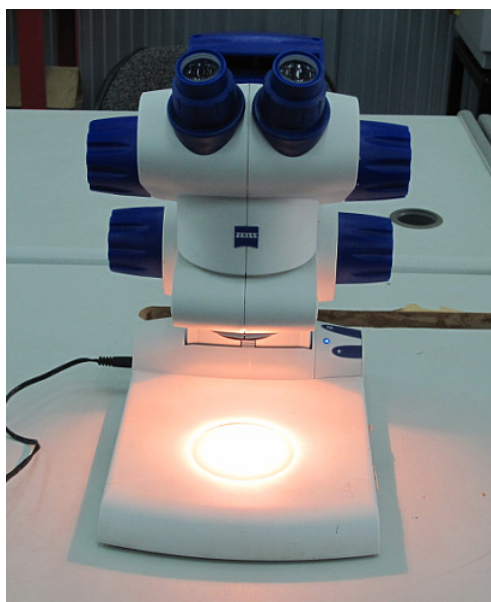
(5) น้ำยาเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้าง มีอัตราส่วนผสมแสดงในภาคผนวก ก



ภาพที่ 3.7 เครื่องขัดกระดาษทราย ขัดสีกลาด



- (6) กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า ใช้ในการดูภาพโครงสร้างมหภาค ดังแสดงในภาพที่ 3.8



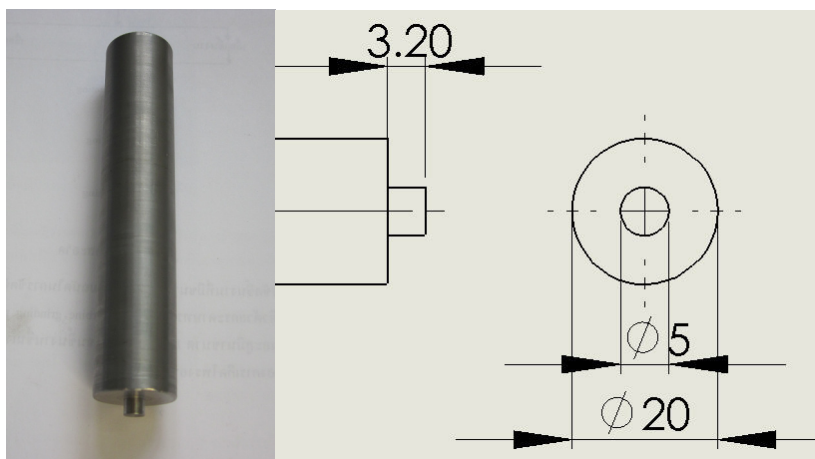
ภาพที่ 3.8 กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า

- (7) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) ใช้ในการดูภาพโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในภาพที่ 3.9



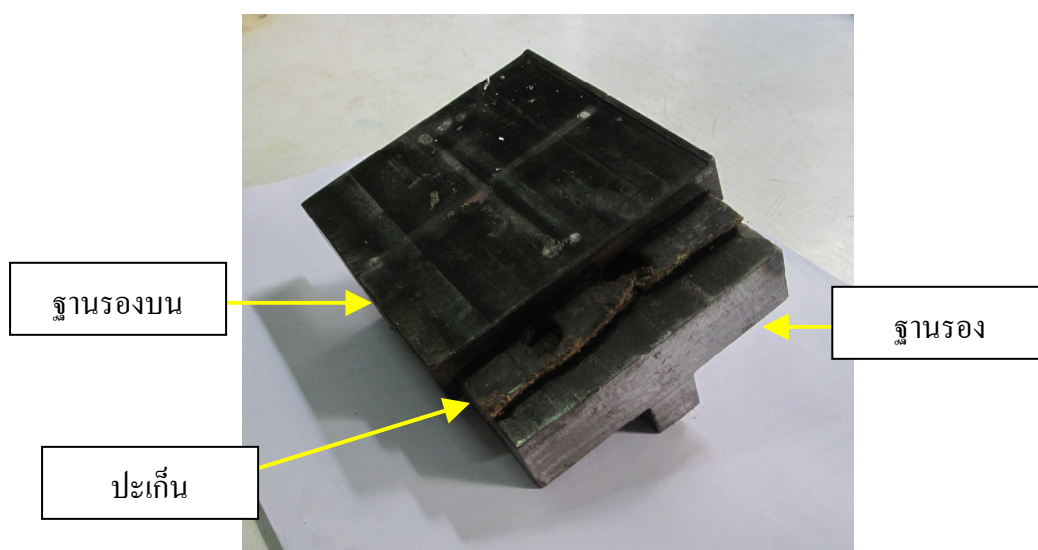
ภาพที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

(8) หัวกวน ใช้ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนทำจากเหล็กเครื่องมือ SKH 57 ซึ่งมีขนาดความโตของบ่ากวน (Shoulder) 20 มิลลิเมตร หัวกวน (Pin) มีขนาดความโต 5 มิลลิเมตร ความยาว 3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ลักษณะของหัวกวน (Tool Pin Profile)

(9) จิก ใช้เป็นแท่นรองแผ่นอะลูมิเนียมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งจะมีตัวกั้นอยู่ด้านหลัง เพื่อป้องกันแผ่นอะลูมิเนียมตกหรือไม่ได้เป็นแนวเดียวกันกับหัวกวน ซึ่งจะประกอบไปด้วยฐานรอง ปะเก็นและแผ่นรองบน ดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ลักษณะของจิก (Jig)

(10) อุปกรณ์จับยึด ใช้ในการจับยึดชิ้นงานในขณะที่เชื่อม เพื่อป้องกันการหลุดออกของแผ่นอะลูมิเนียม ดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึด (Step Clamp)

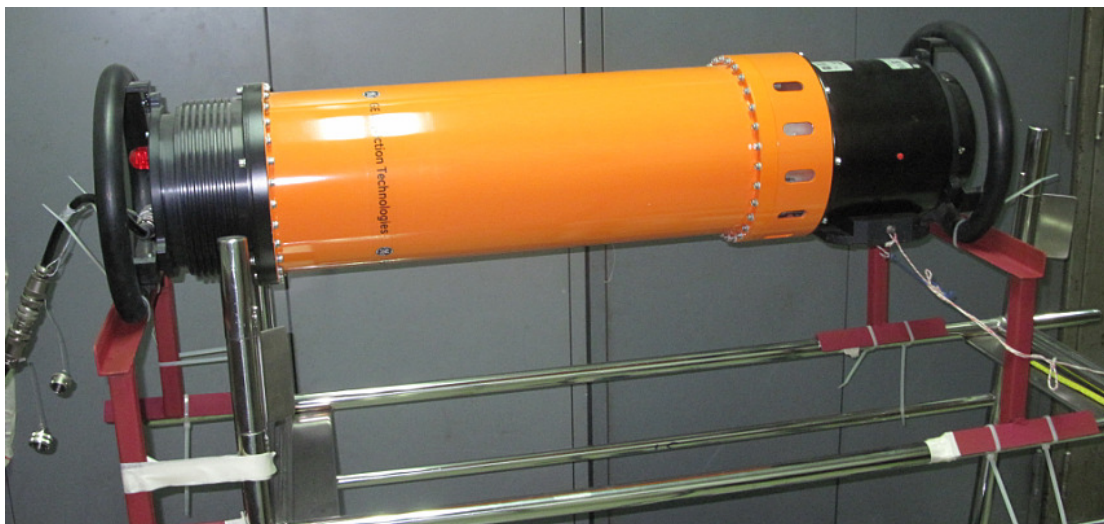
(11) เครื่องอัลตราโซนิกแบบเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic) ยี่ห้อ GE Inspection Technologies รุ่น Phasor XS ใช้ในการตรวจหารอยบกพร่องในแนวเชื่อมหลังจากการเอ็กซ์เรย์ (X-Ray) ดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 เครื่องอัลตราโซนิกแบบเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic)



(12) เครื่องเอ็กซ์เรย์ (X-Ray) ยี่ห้อ GE Inspection Technologies ใช้ในการตรวจหารอยบกร่องในแนวเชื่อมหลังก่อนการตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic) ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 เครื่องเอ็กซ์เรย์ (X-Ray)

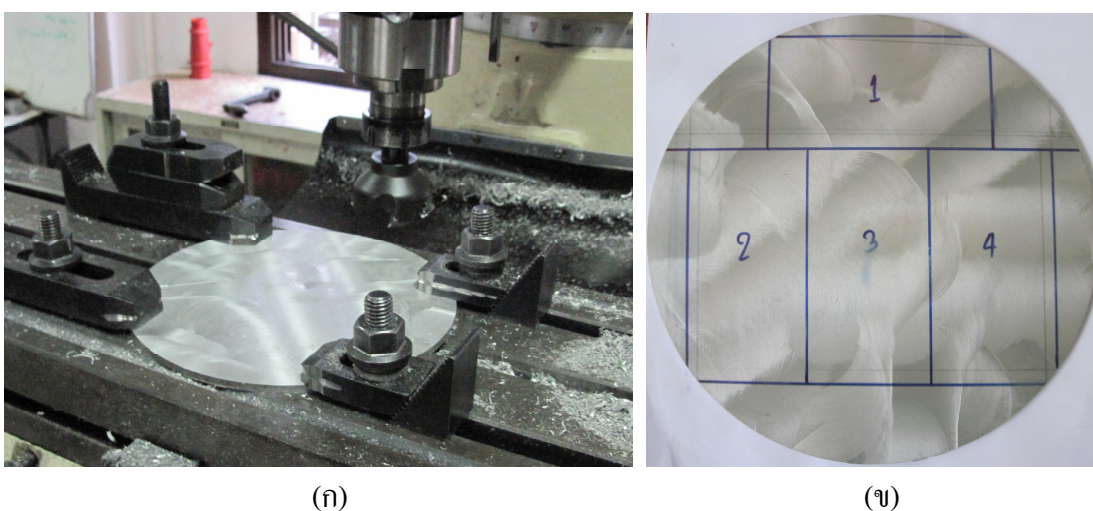
(13) เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง นำชิ้นทดสอบที่เตรียมโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมและตัดตามยาวกับรอยเชื่อมไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง  $1.67 \times 10^{-2}$  mm/s ตามมาตรฐาน ASTM (E8) ดังแสดงในภาพที่ 3.15



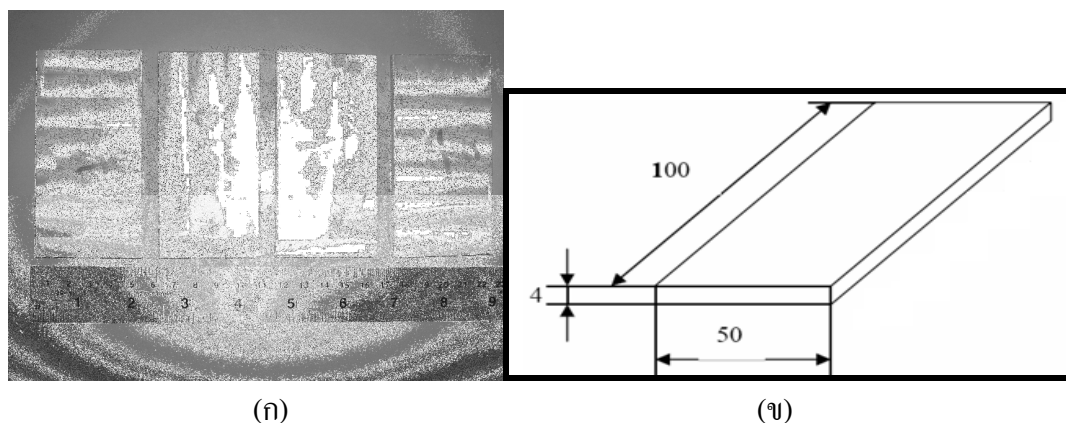
ภาพที่ 3.15 การทดสอบแรงดึง

### 3.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบจากอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356

อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 356 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (Squeeze and Casting) นำไปทำการปรับขนาดผิวชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Milling) ให้มีความหนา 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.16 (ก) และ (ข) แล้วตัดชิ้นงานด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน ให้มีขนาด 100 x 50 x 4 มิลลิเมตร จะได้ชิ้นทดสอบจำนวน 4 ชิ้นต่อหนึ่งแผ่น ดังแสดงในภาพที่ 3.17 (ก) และ (ข)



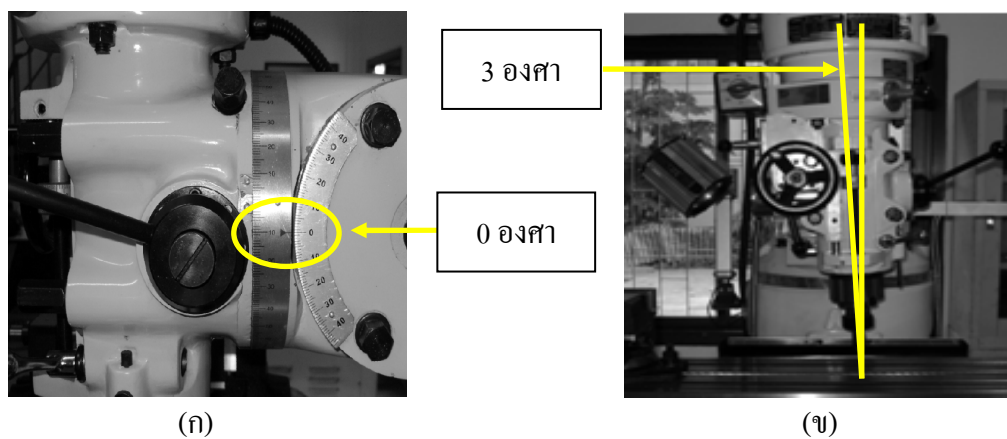
ภาพที่ 3.16 การกัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อกิ่งของแข็ง



ภาพที่ 3.17 ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 ที่ผ่านการกัดและตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน

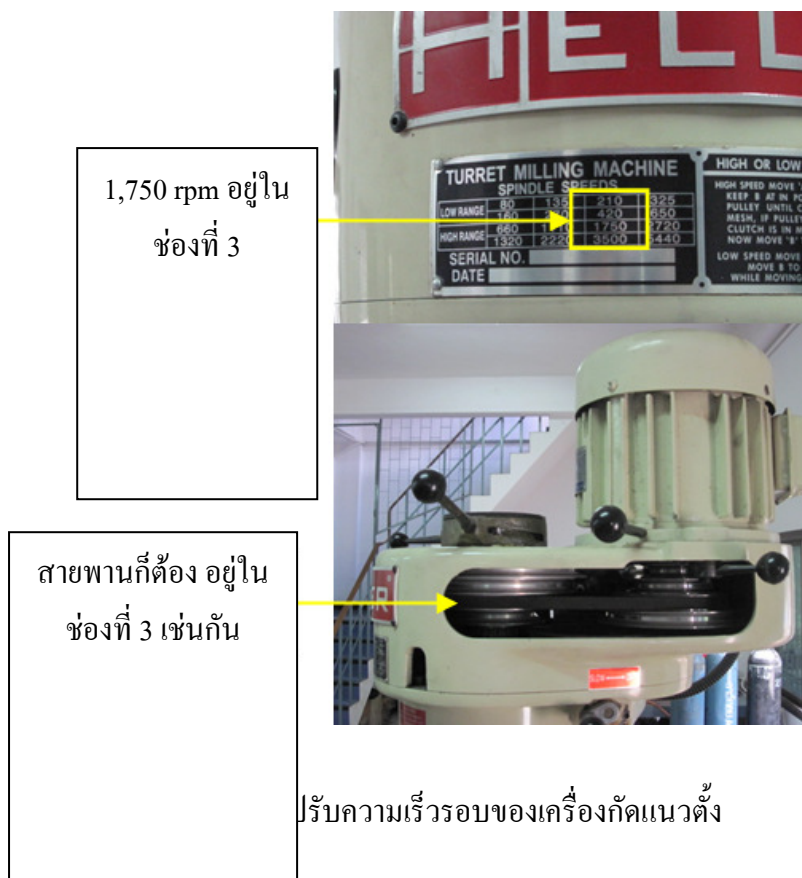
### 3.5 การเตรียมเครื่องการก่อนเชื่อมเสียดทานแบบกวน

(1) การปรับมุมเอียงของเครื่องมือ การปรับมุมเอียงของเครื่องมือเชื่อมโดยการประยุกต์เอาเครื่องกัดแนวตั้งมาเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งจะต้องปรับให้เครื่องมือเอียงทำมุม  $3^\circ$  กับผิวหน้าชิ้นทดสอบ และปรับระดับอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบให้ได้ระดับคงที่ตลอดความยาวของชิ้นทดสอบงานเชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อผสม ดังแสดงในภาพที่ 3.18 (ก) และ (ข)

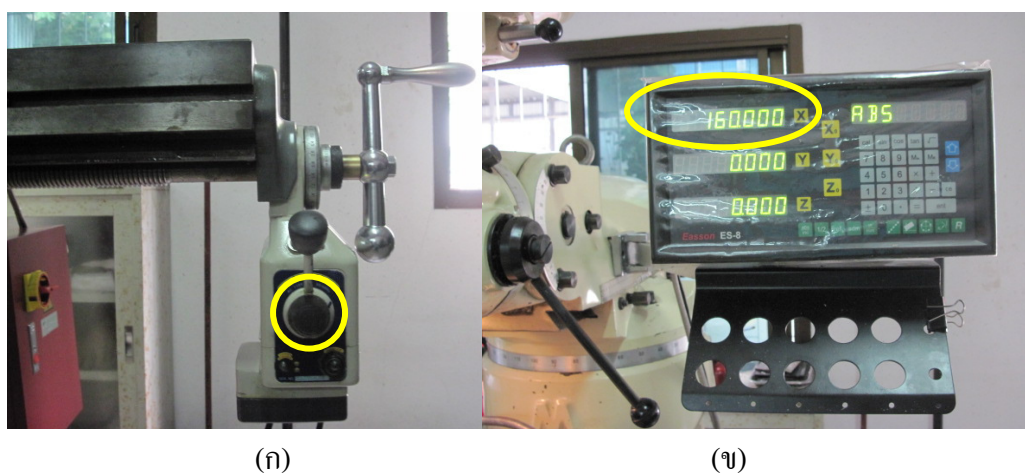


ภาพที่ 3.18 การปรับมุมเอียง 3 องศา ของเครื่องกัดแนวตั้ง

(2) การปรับความเร็วรอบของหัวกวน เป็นการปรับความเร็วรอบของหัวกวนที่สภาพตามการทดลองคือ 1,320 และ 1,750 รอบ/นาที ดังแสดงในภาพที่ 3.19



(3) การปรับความเร็วเดินเชื่อมของหัวกวน เป็นการปรับความเร็วเดินเชื่อมของหัวกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที โดยการหมุนปรับที่อุปกรณ์เดินอัตโนมัติ พร้อมกับทดลองเดินอัตโนมัติ และจับเวลาโดยใช้นาฬิกาจับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 3.20 (ก) จนกว่าค่าบนแกน X จะเป็น 160 มิลลิเมตร/นาที ดังแสดงในภาพที่ 3.20 (ข)

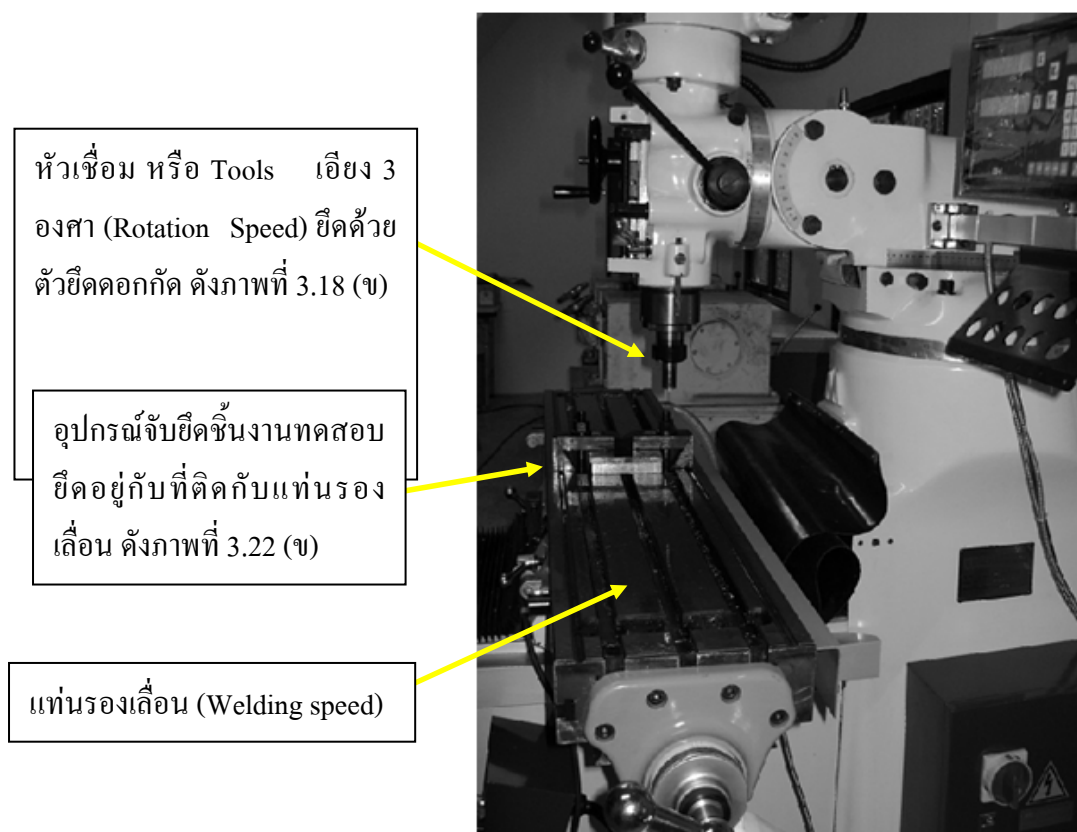


ภาพที่ 3.20 การปรับความเร็วเดินเชื่อมของเครื่องกัดแนวตั้ง

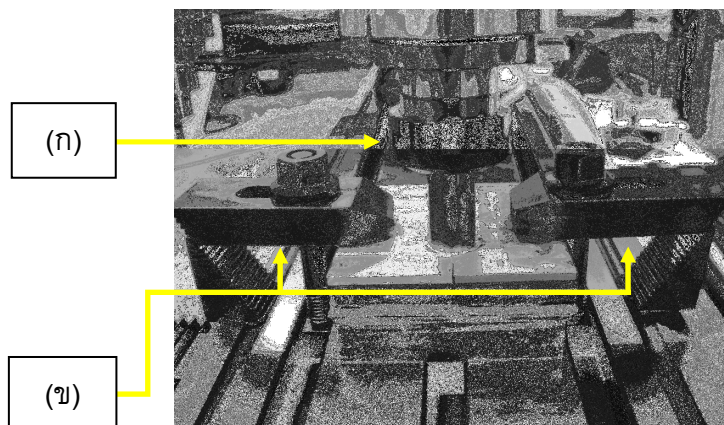


(4) อุปกรณ์ในการจับยึดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนส่วนต่างๆ ของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.21 แสดงส่วนชุดของหัวเชื่อมที่ใช้จับยึดหัวกวน และชุดจับยึดชิ้นงานในการเชื่อมโดยจะวางยึดติดกับแท่นรองเลื่อน

ในการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดและการจับยึดเครื่องมือ ดังแสดงในภาพที่ 3.22 ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะทำการจับยึดชิ้นงานสองชิ้นติดกับแท่นรองชิ้นงาน โดยใช้ตัวล็อกชิ้นงาน ด้านล่างชิ้นงานรองด้วยแผ่นเหล็กหนาสองชั้น โดยมีแผ่นปะเก็นรองอยู่ตรงกลางแผ่นเหล็กทั้งสองชั้น และ Tools ยึดติดกับเพลากันหมุน จากการทดลองจะกำหนดให้ Tools หมุนอยู่กับที่ และชิ้นงานเคลื่อนที่ขณะเดินแนวเชื่อม



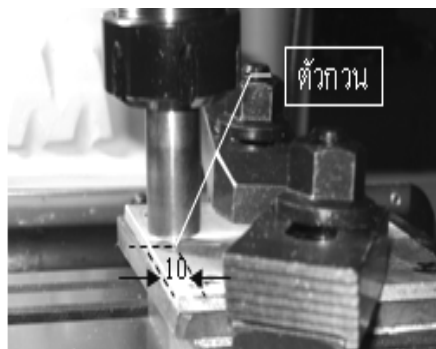
ภาพที่ 3.21 ส่วนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



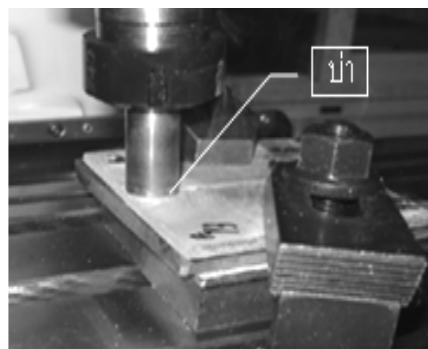
ภาพที่ 3.22 การจับยึดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

### 3.6 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

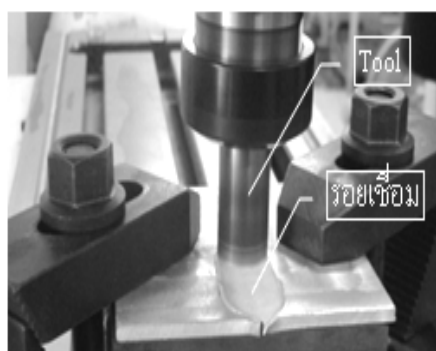
หลังจากการเตรียมวัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นจะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ หัวพินแบบทรงกระบอก ที่ความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,750 rpm และความเร็วในการเดินเชื่อม 160 mm/min จับยึดชิ้นทดสอบให้แน่นกับแท่นรองชิ้นงาน หัวพินห่างจากขอบชิ้นทดสอบ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.23 (ก) และ (ข) เริ่มต้นการเชื่อมโดยการเพิ่มแรงกดด้วยอัตราป้อนคงที่อย่างสม่ำเสมอจนบ่าของ Tool สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานพร้อมกับกำหนดให้แรงกดเริ่มต้นสูงสุดในขณะนั้นคงที่ประมาณ 450 กิโลกรัม ใช้เวลาในการกดขณะนั้นประมาณ 28 วินาที กำหนดให้การเสียดทานคงที่ ณ จุดเริ่มต้น ค้างไว้ประมาณ 20 วินาที หลังจากนั้นก็เริ่มป้อนเดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ ตามเงื่อนไขของแต่ละตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ใน การทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.23 (ค) และ (ง) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกตัวกวนออกจากรอยเชื่อม ให้การเสียดทานคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อม 10 วินาที



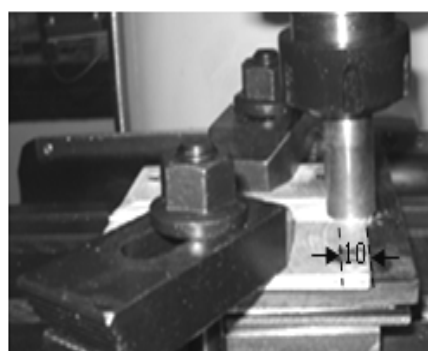
(ก) ป่าของ Tool ห่างจากขอบชิ้นงาน 10 มม.



(ข) แรงกดเริ่มต้น 450 กก. ก่อนเดินแนวเชื่อม 28 วินาที



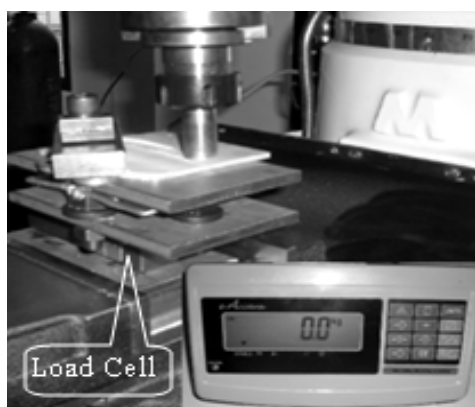
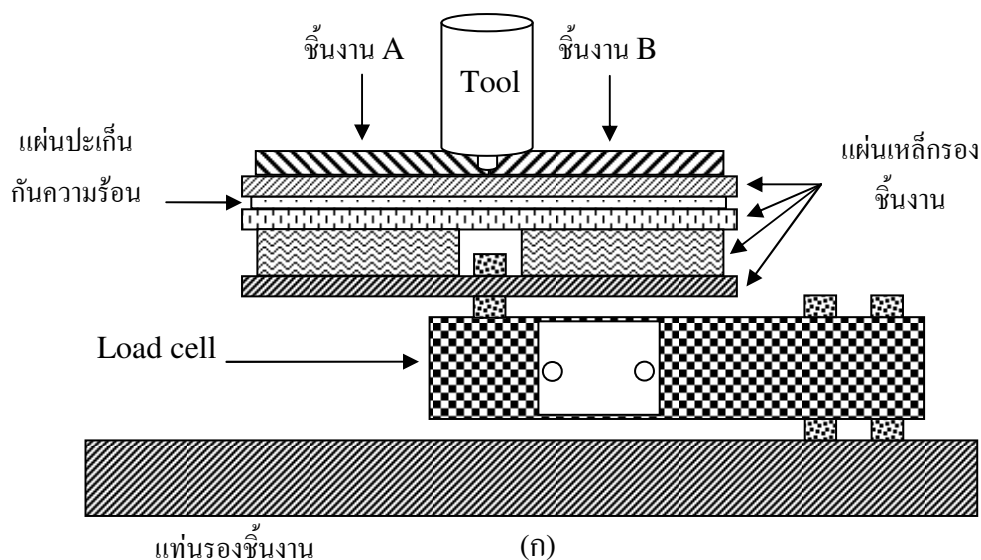
(ค) เดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ



(ง) สิ้นสุดการเดินแนวเชื่อม

### ภาพที่ 3.23 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

(1) การวัดแรงกดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วยเครื่องมือวัด Load cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 จากการทดลองโดยใช้หัวพินแบบทรงกระบอก มีความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,750 rpm และความเร็วในการเดินเชื่อม 160 mm/min แรงกดขณะทำการเชื่อมมีแรงที่เกิดขึ้นสามช่วง ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในขณะเริ่มต้นของการเชื่อมจนบ่าสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดเพิ่มขึ้นจากความเร็วในการเชื่อม ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุมจนสิ้นสุดรอยเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 3.24 (ก) และ (ข) จะทำการบันทึกค่าด้วยกล้องดิจิทัลแบบบันทึกวีดิโอ ได้ มาช่วยในการบันทึกค่าจากจอแสดงผลของเครื่องวัด



ภาพที่ 3.24 การวัดค่าแรงกดในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM 356 โดยใช้ Load cell

(2) การทำกระบวนการทางความร้อน (T6) ซึ่งเป็นสถานะในการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบควมมี 4 สถานะประกอบด้วย 1) As cast + FSW 2) As cast + T6 + FSW 3) As cast + FSW + T6 และ 4) As cast + T6 + FSW + T6 กระบวนการทางความร้อนจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของโลหะหล่ออะลูมิเนียมผสม เช่น ความแข็งแรงและความเหนียวให้สูงขึ้น จึงมีการนำชิ้นงานหล่อไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 ขึ้นตอนทดลองการบ่มชิ้นงานมีดังต่อไปนี้

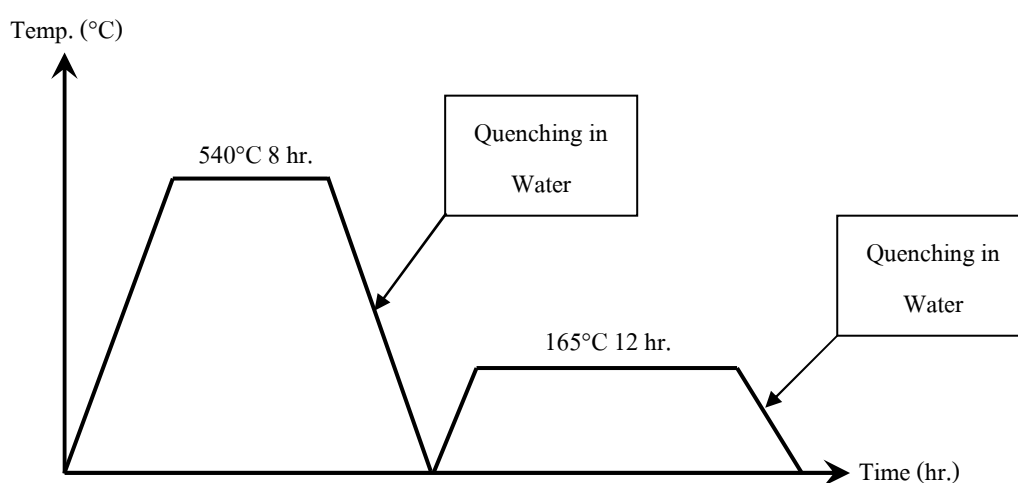
1) นำชิ้นงานใส่ในเตาอบ และเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนกระทั่งอุณหภูมิของเตาเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ  $540^{\circ}\text{C}$  ภายในเวลา 1.07 ชั่วโมง เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วจึงเริ่มจับเวลาการอบขึ้นทดสอบในขั้นตอน Solution Treatment เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง



2) เมื่อทำการอบชิ้นทดสอบตามระยะเวลาต่างๆตามขั้นตอนการทดลอง และจุ่มชิ้นทดสอบลงในน้ำ

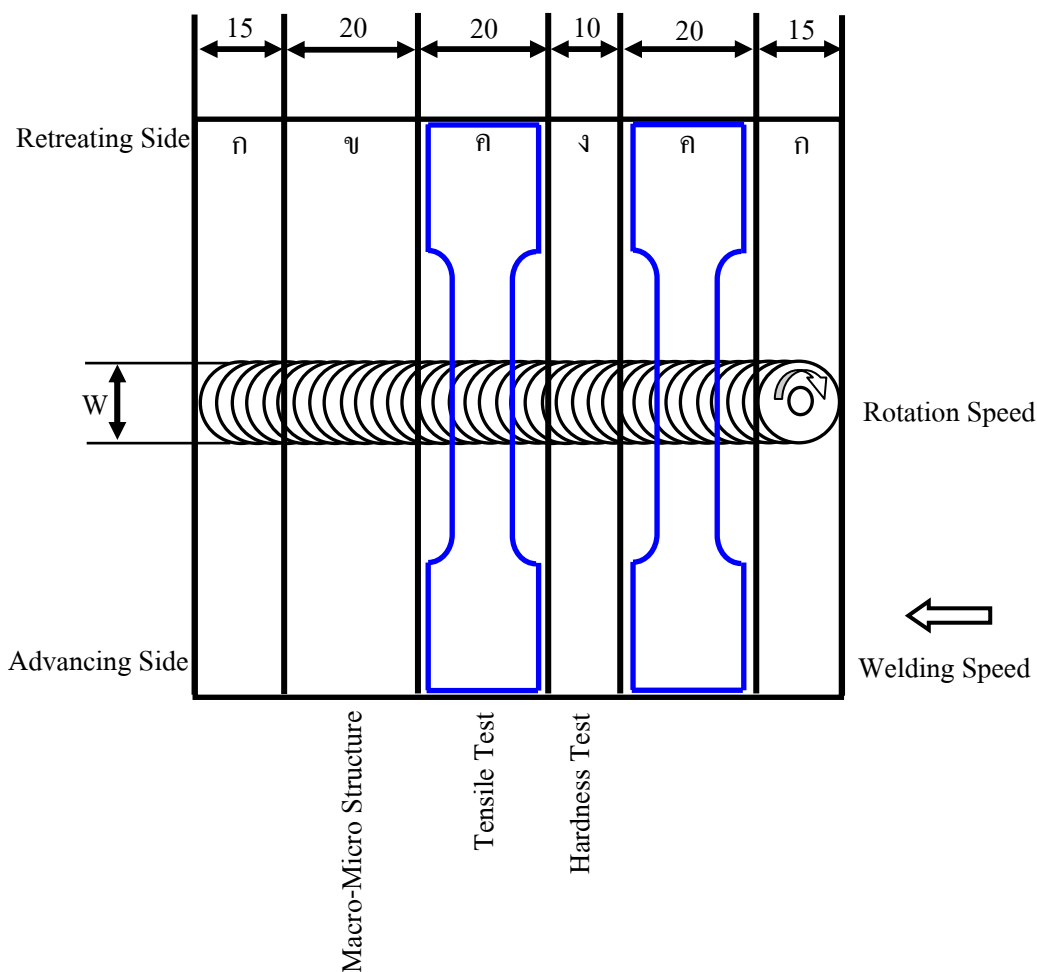
3) เมื่อผ่านขั้นตอนใน ขั้น 1 และ 2 แล้วนำชิ้นทดสอบไปบ่มที่อุณหภูมิ 165°C ภายในเวลา 0.21 ชั่วโมง เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วจึงเริ่มจับเวลาการอบชิ้นทดสอบในขั้นตอน Aging เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง

4) เมื่อทำการบ่มชิ้นทดสอบตามระยะเวลาต่างๆตามขั้นตอนการทดลอง และจุ่มชิ้นทดสอบลงในน้ำ ขั้นตอนดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ขั้นตอนในการทำกระบวนการทางความร้อน T6

(3) การ Lay Out ตัดชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานเสร็จแล้วนำแผ่นงานที่เชื่อมไป Lay Out เพื่อตัดชิ้นงานไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบทางโลหะวิทยาและทดสอบทางกล แสดงดังภาพที่ 3.26 ลักษณะของการตัดชิ้นทดสอบ (ก) ตำแหน่งเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดรอยเชื่อม (ข) ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (ค) ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ง) ชิ้นงานทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (W) ตามกว้างของรอยเชื่อม

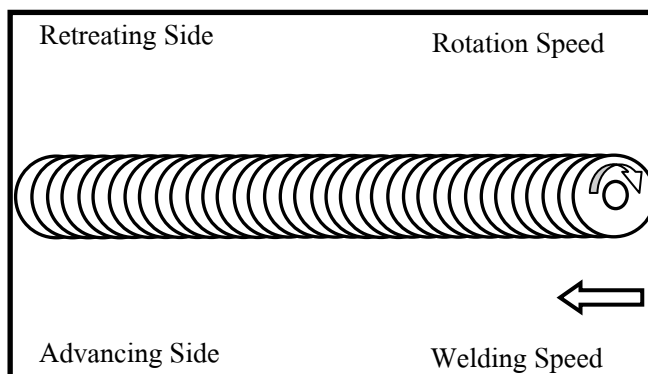


ภาพที่ 3.26 การ Lay Out ชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล

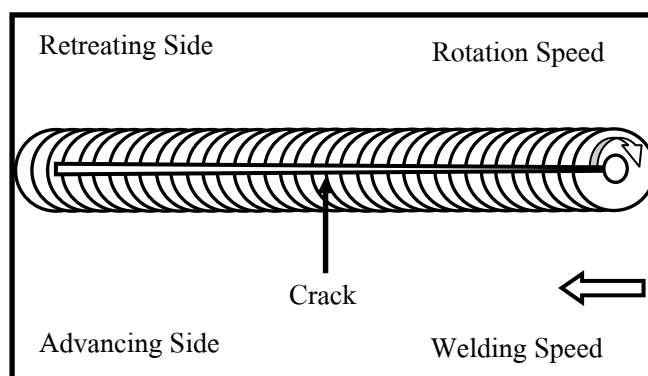
### 3.7 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม

(1) การตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยสายตา การตรวจสอบผิวหน้าของรอยเชื่อมจากภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลกำลังขยายต่ำในแต่ละตัวแปรของการเชื่อม เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม ลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดจากป่าของ Tool ตรวจสอบการซึมลึกของรอยเชื่อม หลังจากการเชื่อมจะทำการตรวจสอบรอยเชื่อมบริเวณด้านบนและด้านล่าง ด้วยสายตาเพื่อดูว่ารอยเชื่อมมีการประสานกันของชิ้นงานทั้งสองชิ้นที่นำมาเชื่อมต่อกันได้ดีเพียงใด ดังแสดงในภาพที่ 3.27 มีการประสานกันที่ดีของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชิ้น หรืออีกในกรณีหนึ่ง เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วหากพบว่ารอยเชื่อมไม่ประสานกันหลังจากการ

เชื่อมแสดงว่ารอยเชื่อมนั้นไม่สามารถใช้งานได้ จะต้องทำการศึกษาและปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 3.28

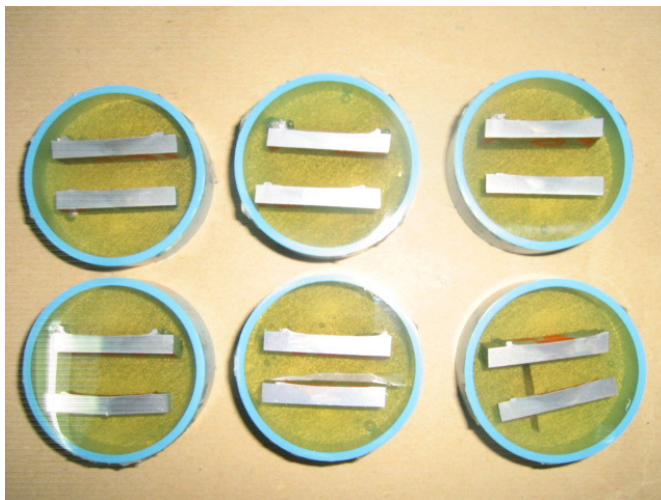


ภาพที่ 3.27 รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่มีความสมบูรณ์



ภาพที่ 3.28 รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่ไม่สมบูรณ์

(2) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค หลังจากการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ของรอยเชื่อม ก็นำชิ้นงานไป Lay Out และตัด ดังแสดงในภาพที่ 3.29 จากนั้นนำไปเคลือบด้วยน้ำยา Epoxy ดังภาพที่ 3.29 ขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 150, 320, 400, 600, 800, 1,000 ถึงเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดวงกระดาษทรายลงบนแผ่นงานขัดหน้าเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะรวมถึงซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิมจนกว่าจะถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงในภาพที่ 3.30

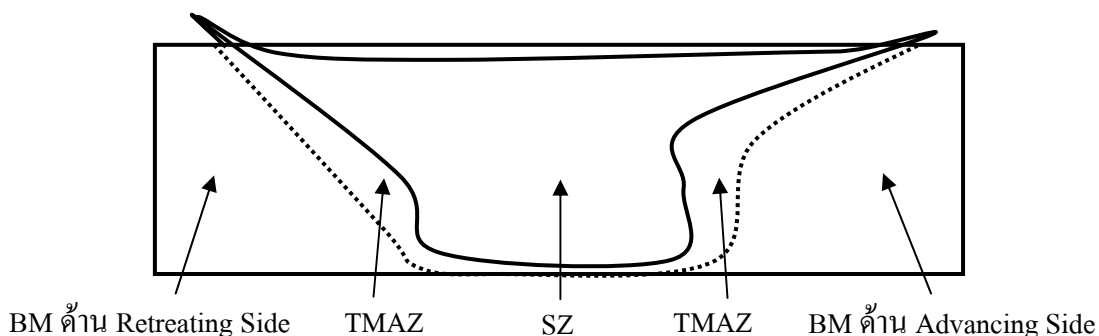


ภาพที่ 3.29 ชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยา Epoxy



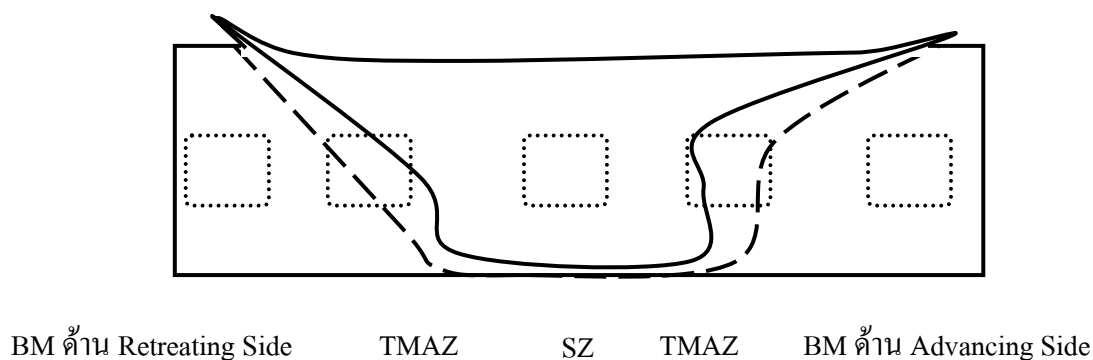
ภาพที่ 3.30 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา

จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) ที่มีขนาดตั้งแต่ 5 - 1 ไมครอน กัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลายเจ็องจัน Keller's Reagent ส่วนผสมแสดงดังภาคผนวก ก และนำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์และน้ำเคลือบป้องกันออกไซด์ ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องกำลังขยาย 2-4 เท่า เพื่อดูลักษณะการไหลวนของเกรนภายในรอยเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 3.31



ภาพที่ 3.31 โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

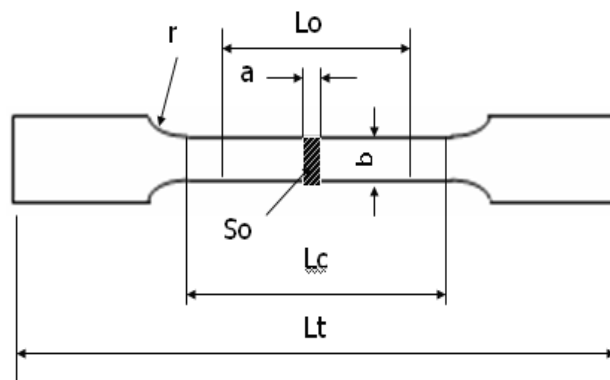
(3) การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ขึ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง OM เป็นชิ้นงานทดสอบเดียวกันกับชิ้นงานทดสอบโครงสร้างมหภาค ซึ่งหลังจากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแล้วก็นำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Micro-Specimen) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 50 ถึง 200 เท่า เพื่อตรวจสอบโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางด้าน Retreating Side กับ Advancing Side และบริเวณที่ถูกกวนของรอยเชื่อม ตรวจสอบข้อบกพร่องและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมแต่ละตัวแปรของการเชื่อม อีกทั้งดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกรนหลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.32 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมด้วยกล้อง OM

### 3.8 การทดสอบความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด A356 ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่กำหนดคือ As cast + FSW, As cast + T6 + FSW, As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6 ที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม แสดงดังภาพที่ 3.33 โดยให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบนำไปกัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM (E8) ขนาดต่างๆของชิ้นทดสอบแสดงดังภาคผนวก ก และทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3.33 ขนาดมาตรฐาน ASTM (E8) ของชิ้นทดสอบ



ภาพที่ 3.34 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม

การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม SSM 356 ซึ่งหลังจากการหล่อ  
 กิ่งของแข็ง (BM) เพื่อนำค่าจากการทดสอบแรงดึงของเนื้อโลหะเดิมไปเปรียบเทียบกับค่าความ  
 แข็งแรงดึงที่ทำการเชื่อม โดยการนำไปลดขนาดด้วยเครื่องกัดแนวตั้งและตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อที่จะ  
 นำไปกัดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 3.34 เตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน  
 ASTM (E8) แสดงดังภาพที่ 3.35 ขนาดของชิ้นทดสอบดังภาพที่ 3.33 ดังนี้  $a = 4$ ,  $b = 6$ ,  $r = 12$ ,  $L_0 = 24$ ,  $L_t = 100$ ,  $L_c = 27$  mm. และ  $S_0 = 24$  mm<sup>2</sup>



ภาพที่ 3.35 การเตรียมชิ้นทดสอบของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ เตรียมชิ้น  
 ทดสอบโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อม โดยการเตรียมจะใช้วิธีการเดียวกันกับการเตรียมชิ้นงาน  
 ทดสอบของเนื้อโลหะเดิม ชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรง  
 ของรอยเชื่อม (Strength of Weld) จากชิ้นงานเชื่อมต่อชนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดัง  
 ภาพที่ 3.35 โดยการทดสอบแรงดึงในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน นำชิ้นทดสอบที่เตรียมโดยการ  
 ตัดตามขวางกับรอยเชื่อมไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง  $1.67 \times 10^{-2}$  mm/s  
 ตามมาตรฐาน ASTM (E8) แสดงดังภาพที่ 3.36



ภาพที่ 3.36 การทดสอบแรงดึง



### 3.9 การตรวจสอบรอยบกพร่องแนวเชื่อม

การเตรียมอุปกรณ์ในการตรวจหารอยบกพร่องด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส นั้น ได้ทำการเตรียมในส่วนของเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic) หัวตรวจสอบ (Wedges) มีจำนวนผลึก 16 Element มุมที่ใช้ในการตรวจสอบตั้งแต่ 30-75 องศา ความถี่คลื่นเสียงที่ใช้ 14-17 MHz และตัวนำส่งสัญญาณ (Coupling) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวได้เตรียมที่กรมวิทยาศาสตร์บริการทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 3.37-3.38 ส่วนของการตรวจหารอยบกพร่องด้วยการเอ็กซ์เรย์ จะใช้ความเข้มของรังสี 120 kVp และ 2 mA.min ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวได้ใช้ที่สำนักงานปริมาณเพื่อสันติ



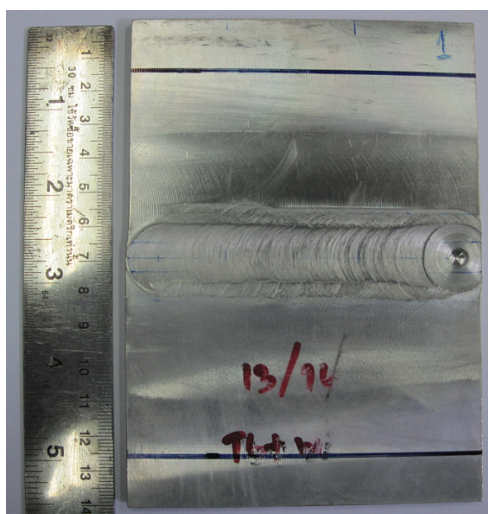
ภาพที่ 3.37 ลักษณะของหัวตรวจสอบ (Wedges) ของเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส



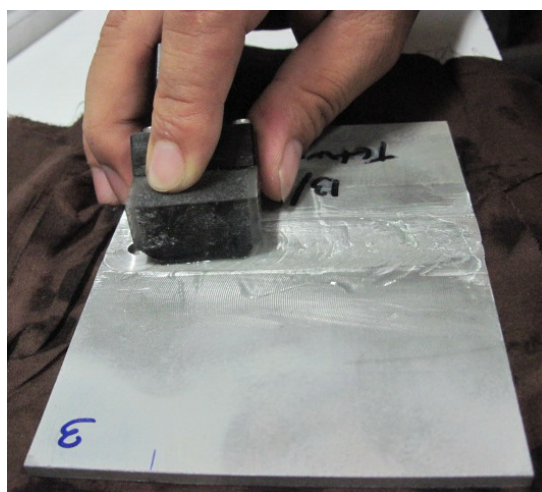
ภาพที่ 3.38 ลักษณะของเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส



ในส่วนของชิ้นงานเพื่อตรวจสอบการเชื่อมด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส ได้เตรียมที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิธีการเตรียมเหมือนกับสถานะต่าง ๆ ที่ทำการทดลองแต่แตกต่างกันที่ขนาดของความกว้างชิ้นงาน โดยมีขนาดความกว้างของชิ้นงานก่อนเชื่อม 70 มิลลิเมตร เมื่อเชื่อมเสร็จจะมีขนาดกว้างคูณยาวเท่ากับ 100x140 มิลลิเมตร เพื่อให้หัวตรวจสอบสามารถเดินทางได้ทั่วทั้งชิ้นงาน และผิวด้านบนรอยเชื่อมจะทำการปาดหน้าเอาครีปที่เกิดจากการเชื่อมออก เพื่อให้หัวตรวจสอบเข้าถึงบริเวณตรงกลางแนวเชื่อม แสดงดังภาพประกอบที่ 3.39-3.40



ภาพที่ 3.39 ลักษณะชิ้นงานเชื่อมก่อนตรวจสอบการเชื่อมด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส



ภาพที่ 3.40 ลักษณะการตรวจสอบการเชื่อมด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส

### 3.10 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ

การกำหนดขนาดตัวอย่าง

การกำหนดขนาดตัวอย่าง (n) เพื่อที่จะหาขนาดตัวอย่างที่สามารถเป็นตัวแทนของประชากรได้ ค่าคงซึ่งที่กำหนดให้ใช้มีดังนี้

Type I Error (Alpha:  $\alpha$ ) = 0.05

Power (1-  $\beta$ ) = 0.95

Number of Center Point = 0

Estimate ( $\sigma$ ) ประมาณค่าได้โดยนำผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองประมวลผลด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ เพื่อประมาณค่าความแปรปรวน (Standard Deviation :  $\sigma$ ) ได้เท่ากับ 38.8 แสดงในตารางที่ 3.2 โดยได้จากค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของการทดสอบด้วยแรงดึงจากการทดลองเบื้องต้น 1 ซ้ำ จำนวน 8 ซ้ำ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 การหาค่าความแปรปรวน

| Descriptive Statistics :        |         |      |        |         |        |         |         |
|---------------------------------|---------|------|--------|---------|--------|---------|---------|
| Ultimate Tensile Strength (UTS) |         |      |        |         |        |         |         |
| N                               | Percent | Mean | Median | SE Mean | St Dev | Minimum | Maximum |
| 8                               | 100     | 56.1 | 154.8  | 13.5    | 38.8   | 106.2   | 228.3   |

ตารางที่ 3.3 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากการทดลองเบื้องต้น

| ชั้นทดลองที่ | ลำดับการเชื่อมแบบสุ่ม | ความเร็วรอบ (rpm) | ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min) | สถานะทางความร้อน | ความแข็งแรงสูงสุด (MPa) |
|--------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| 1            | 3                     | 1320              | 160                         | FSW+T6           | 228.3                   |
| 2            | 4                     | 1320              | 160                         | T6+ FSW +T6      | 137.6                   |
| 3            | 1                     | 1320              | 160                         | FSW              | 165.4                   |
| 4            | 6                     | 1750              | 160                         | T6+ FSW          | 173.5                   |
| 5            | 5                     | 1750              | 160                         | FSW              | 174.4                   |

ตารางที่ 3.3 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

| ชั้นทดลองที่ | ลำดับการเชื่อมแบบสุ่ม | ความเร็วรอบ (rpm) | ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min) | สถานะทางความร้อน | ความแข็งแรงสูงสุด (MPa) |
|--------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| 6            | 8                     | 1750              | 160                         | T6+ FSW +T6      | 144.2                   |
| 7            | 2                     | 1320              | 160                         | T6+ FSW          | 119.4                   |
| 8            | 7                     | 1750              | 160                         | FSW +T6          | 106.2                   |

Minimum Effect (D) ได้จากค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด มีค่าเท่ากับ  $228.3-106.2=122.1$  ดังนั้นค่าขนาดของตัวอย่างโดยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ ได้ขนาดตัวอย่าง (Sample Size: n) ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ เท่ากับ 4 ซ้ำ แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การกำหนดขนาดของตัวอย่าง

| Power and Sample Size   |          |             |              |              |                    |
|---|----------|-------------|--------------|--------------|--------------------|
| Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 38.8 Number of Levels = 4 |          |             |              |              |                    |
| Two-way ANOVA   | SS Means | Sample Size | Target Power | Actual Power | Maximum Difference |
|   | 7454.21  | 4           | 0.95         | 0.977586     | 122.1              |

## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

การวิจัยเพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ และเพื่อหารอยบกพร่อง (Defects) ของแนวเชื่อมในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ โดยการตรวจสอบแบบ Phased Arrays Ultrasonic เทียบกับการ X-Ray ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงวิธีการวิจัย โดยต่อไปจะเป็นผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งในการทดลองนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือการหาค่าแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ และการตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส เทียบกับเครื่องเอ็กซ์เรย์

#### 4.1 การตรวจสอบลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ลักษณะผิวรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 160 mm/min และในสภาพของลำดับทางความร้อน (T6) ต่างๆ มีลักษณะทางกายภาพของผิวรอยเชื่อมในปัจจุบัน และระดับต่างๆ ดังนี้

##### 4.1.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min

ผลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังภาพที่ 4.1 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่าผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมสูง 160 mm/min อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมยังน้อยที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติก และที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) มีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อยของด้าน Retreating อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้ออะลูมิเนียมได้สะดวก ล้นออกจากบ่าของ Tool เกิดเป็นครีบด้าน Retreating Side เพราะว่าด้าน Retreating Side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool สวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม พบว่า

บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมเกิดการประสานกันที่ดีในรอยเชื่อมต่อชน และบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน นอกจากนี้บริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังภาพที่ 4.1 (ก) และ (ง) จะเกิดการพองบริเวณผิวแนวเชื่อม ปริมาณการพองของแนวเชื่อมที่ As cast + FSW + T6 มีน้อยกว่าแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW + T6 และลักษณะของสีผิวชิ้นงานมีความเข้มขึ้นกว่าแนวเชื่อมที่ As cast + FSW และ As cast + T6 + FSW



(ก) ในสภาวะ As cast + FSW



(ข) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW



(ค) ในสภาวะ As cast + FSW + T6



(ง) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW + T6

ภาพที่ 4.1 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min

(RS) Retreating Side, (AS) Advancing Side

#### 4.1.2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min

ผลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังภาพที่ 4.2 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่าผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมสูง 160 mm/min อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมยังน้อยที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติก และที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) มีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่เรียบไม่เกิดเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool อีกทั้งเกิดครีบมากขึ้นในของด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้ออะลูมิเนียมได้สะดวก ล้นออกจากบ่าของ Tool เกิดเป็นครีบเกิดเป็นครีบด้าน Retreating Side เพราะด้าน Retreating Side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool สวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม พบว่าบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมเกิดการประสานกันที่ดีในรอยเชื่อมต่อชน และบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน นอกจากนี้บริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังภาพที่ 4.2 (ค) และ (ง) จะเกิดการพองบริเวณผิวแนวเชื่อม ปริมาณการพองของแนวเชื่อมที่ As cast + FSW + T6 มีน้อยกว่าแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW + T6 และลักษณะของสีผิวชิ้นงานมีความเข้มขึ้นกว่าแนวเชื่อมที่ As cast + FSW และ As cast + T6 + FSW



(ก) ในสภาวะ As cast + FSW



(ข) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW



(ค) ในสภาวะ As cast + FSW + T6



(ง) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW + T6

ภาพที่ 4.2 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min

(RS) Retreating Side, (AS) Advancing Side

#### 4.1.3 วิเคราะห์ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสถานะทางความร้อนที่ต่างกัน

จากการวิเคราะห์ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อมความเร็วเชื่อมและสถานะทางความร้อนที่ต่างกัน ดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าผิวหน้ารอยเชื่อมของทั้งสองแบบมีลักษณะเรียบและสะอาด ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมสูง 160 mm/min (Zhao Y.H. et al., 2005) อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมยังน้อยที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสถานะพลาสติก และที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) มีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อยของด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสถานะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้ออะลูมิเนียมได้สะดวกหลุดออกจากบ่าของ Tool เกิดเป็นครีบด้าน Retreating Side เพราะวาด้าน Retreating Side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool สวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม (Kim Y.G. et al., 2005) พบว่าบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมของแนวเชื่อมทั้งสองแบบเกิดการประสานกันที่ดีของรอยเชื่อมต่อชน และบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะเกิดรูปบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมความเร็วหมุนของหัวพินสูงจะเกิดครีบมากกว่าความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ อีกทั้งรอยบ่าของ Tool ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) จะหยาบกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) อันเนื่องมาจากความเร็วหมุนของหัวพินสูงขณะเดินแนวเชื่อมมีความร้อนสะสมมากกว่าความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ จึงทำให้เนื้อของอะลูมิเนียมเกิดความต้านทานภายในเนื้อของอะลูมิเนียมมากกว่าความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ และทำให้เกิดความร้อนมากกว่าอีกด้วย ทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสถานะพลาสติกมากพอที่จะทำให้เกิดครีบหลุดออกจาก Tool มากกว่าและเกิดรอยบนผิวหน้ารอยเชื่อมมากกว่าความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ นอกจากนี้บริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ทั้งภาพ (ค) และ (ง) จะเกิดการพองบริเวณผิวแนวเชื่อม อันเนื่องมาจากการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงและเป็นเวลานาน ทำให้รูพรุนที่มีอากาศอยู่ใต้ผิวงานเกิดการดันตัวและพองออกมานอกผิวงานในที่สุดแต่สามารถหลีกเลี่ยงการพองของผิวงานได้ด้วยวิธีกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาสั้นอุณหภูมิต่ำ (Lumley R.N. et al., 2007) อีกทั้งปริมาณการพองของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) มีมากกว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm)

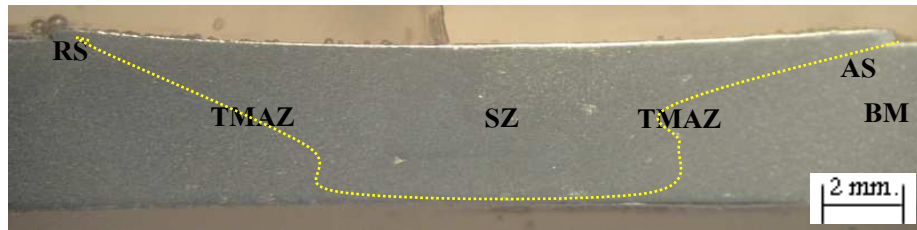


## 4.2 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน

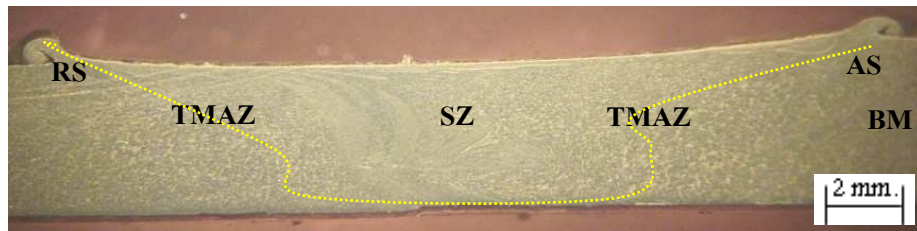
การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมและให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบ ขัดตามขั้นตอนของการเตรียมชิ้นทดสอบ กัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายเจือจาง Keller's Reagent เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating Side และด้าน Advancing Side ด้วยกล้องที่มีกำลังขยายต่ำ 2-8 เท่า ที่ความเร็วหมุนของ Tools ที่ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 160 mm/min และสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน

### 4.2.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min

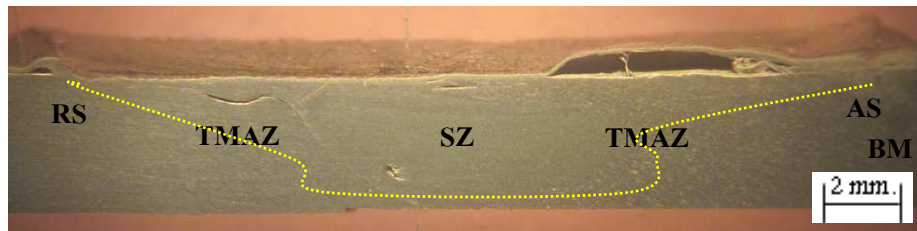
จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 แสดงดังภาพที่ 4.3 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่าบริเวณที่รอยเชื่อมถูกกวนของสภาวะ As cast + FSW และ As cast + T6 + FSW ไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม ซึ่งมีลักษณะที่ประสานกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยเชื่อมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ ตัวกวน เมื่ออะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวจะมีลักษณะคล้ายกับหัวหอมที่มีภาพแบบชัดเจนเป็นชั้น ๆ ตามทิศทางการกวนของหัวพิน และในขณะเดียวกันที่รอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังภาพที่ 4.3 (ค) และ (ง) จะปรากฏรอยแตก (Crack) บริเวณรอยเชื่อม จากการสังเกตในบริเวณที่ถูกกวนจะมีลักษณะของโครงสร้างที่เรียกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม อีกทั้งในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating Side จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แคบกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing Side อันเนื่องมาจากด้าน Retreating Side เป็นทิศทางที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างเกิดการไหลวนสวนทางกันคล้ายกับถูกอัด และด้าน Advancing Side มีโครงสร้างที่คล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากเป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของหัวพินกับทิศทางการเดินแนวเชื่อมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



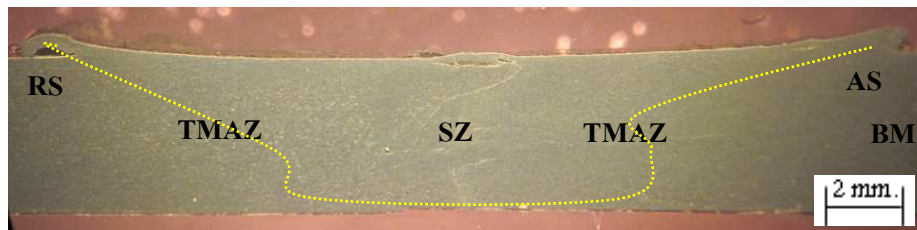
(ก) ในสภาวะ As cast + FSW



(ข) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW



(ค) ในสภาวะ As cast + FSW + T6

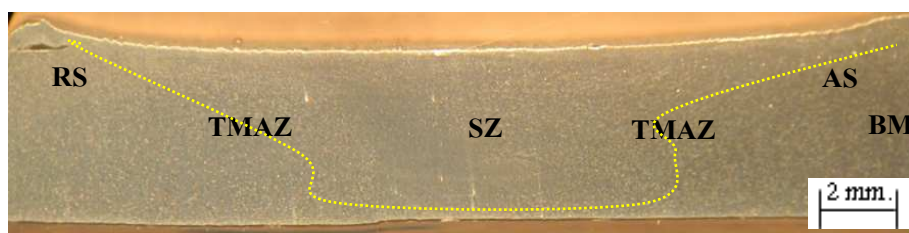


(ง) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW + T6

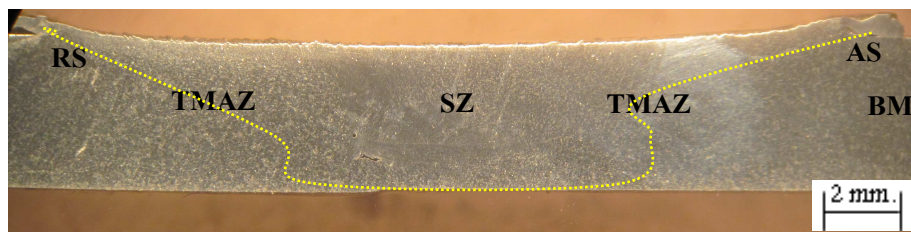
ภาพที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ 1,320 rpm 160 mm/min  
 (RS) Retreating Side, (AS) Advancing Side, (TMAZ) Thermo-Mechanical Affected Zone,  
 (SZ) Stir Zone, (BM) Base Metal

#### 4.2.2 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min

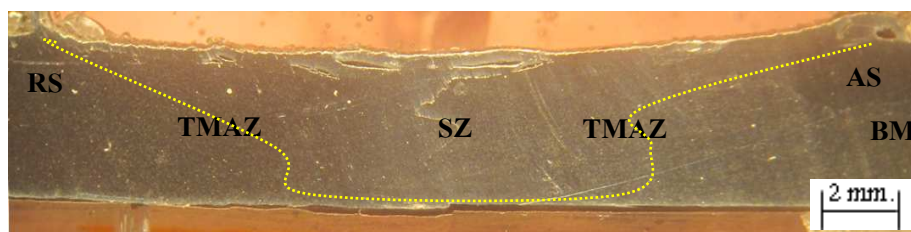
จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง 356 แสดงดังภาพที่ 4.4 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่าบริเวณที่รอยเชื่อมถูก กวนของสภาวะ As cast + FSW และ As cast + T6 + FSW ไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอย เชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอย เชื่อมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ ตัวกวน เมื่ออะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวจะมี ลักษณะภาพร่างคล้ายกับหัวหอมที่มีภาพแบบชัดเจนเป็นชั้น ๆ ตามทิศทางการกวนของหัวพิน และ ในขณะเดียวกันที่รอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังภาพที่ 4.4 (ค) และ (ง) จะปรากฏรอยแตก (Crack) บริเวณรอยเชื่อม จากการสังเกตในบริเวณที่ถูกกวนจะมี ลักษณะของโครงสร้างที่เรียบกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม อีกทั้งในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความ ร้อนทางกลด้าน Retreating Side จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แคบกว่าบริเวณที่ได้รับ อิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing Side อันเนื่องมาจากด้าน Retreating Side เป็นทิศทาง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างเกิดการ ไหลวนสวนทางกันคล้ายกับถูกอัด และด้าน Advancing Side มีโครงสร้างที่คล้ายกับถูกดึงเป็น บริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากเป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของหัวพินกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม เป็นไปในทิศทางเดียวกัน



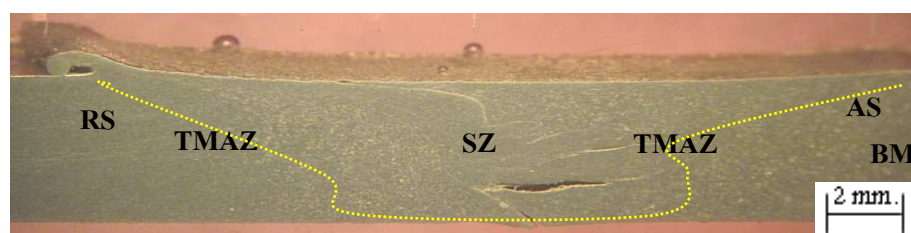
(ก) ในสภาวะ As cast + FSW



(ข) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW



(ค) ในสภาวะ As cast + FSW + T6



(ง) ในสภาวะ As cast + T6 + FSW + T6

ภาพที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ 1,750 rpm 160 mm/min  
 (RS) Retreating Side, (AS) Advancing Side, (TMAZ) Thermo-Mechanical Affected Zone,  
 (SZ) Stir Zone, (BM) Base Metal

#### 4.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัณดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าบริเวณที่รอยเชื่อมถูกกวนของสภาวะ As cast +

FSW และ As cast + T6 + FSW ไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยเชื่อมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ ตัวแกน เมื่ออะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมจะมีลักษณะภาพร่างคล้ายกับหัวหอมรีที่มีภาพแบบปรากฏชัดเจน อันเนื่องมาจากแรงกดและความร้อน ทำให้การไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมเป็นแบบเรียบและมีทิศทางการไหลวนในลักษณะที่แน่นอนรอบตัวแกน อีกทั้งพบว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของหัวพินสูงมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากกว่าทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเป็นบริเวณกว้างกว่าการเชื่อมด้วยความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (Ma Z.Y. et al., 2006) ในขณะเดียวกันที่รอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม แสดงดังภาพที่ 4.4 และ 4.5 ทั้ง ภาพ (ค) และ (ง) จะปรากฏรอยแตก (Crack) บริเวณรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน (Chen Y.C. et al, 2005) ซึ่งการแตกของแนวเชื่อมเกิดขึ้นในระหว่างการชุบน้ำหลังจากขั้นตอนกระบวนการอบละลาย (Solution Treatment) จากการสังเกตบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) จะมีลักษณะรอยแตกกว้างมากกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) อันเนื่องมาจากรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) มีความแข็งของรอยเชื่อมคืออยู่แล้ว ค่าความแข็งแนวเชื่อมแสดงดังภาคผนวก ค เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้นไปอีกจนเกินขีดจำกัดและเกิดการแตกร้าวในที่สุด

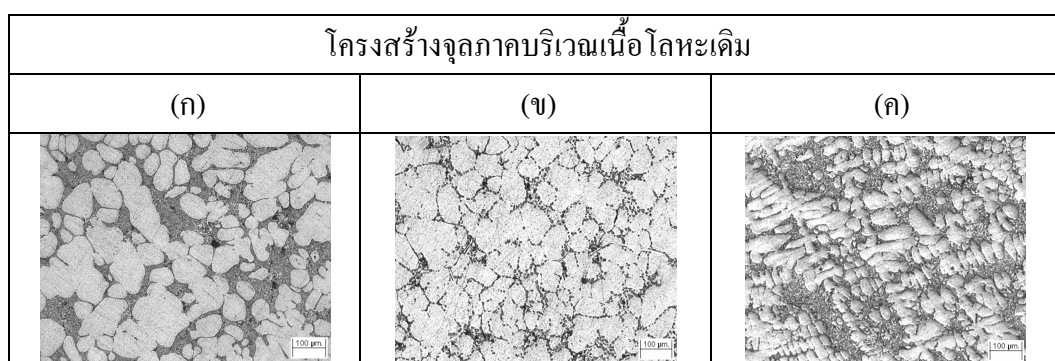
### 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง (Optical Microscope: OM) พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา ( $\alpha$ ) แบบกึ่งอนกลมผสมกับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย Al+Si

#### 4.3.1 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม

โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ผ่านสภาวะทางความร้อน แสดงดังภาพที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมเกรนของเฟส  $\alpha$ -Al แสดงดังภาพที่ 4.5 (ก) เป็นลักษณะกึ่งอนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Si, Fe and Mg จับกลุ่มรอบเฟส

$\alpha$ -Al โครงสร้างทางจุลภาคสภาวะทางความร้อน T6 ก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณเนื้อโลหะเดิม เกรนของเฟส  $\alpha$ -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Si ลักษณะภาพทรงกลมกระจัดกระจาย ไม่เป็นระเบียบรอบเฟส  $\alpha$ -Al มีการแพร่ของซิลิกอนออกจากเฟสยูเทคติกซิลิกอนและละลายเข้าสู่ อะลูมิเนียมเมตริกซ์ (Akhter R. et al., 2007; Moller H. et al, nd.) แสดงดังภาพที่ 4.5 (ข) โครงสร้างทางจุลภาคของสภาวะการเชื่อม Artificially aged หลังการเชื่อม บริเวณเนื้อโลหะเดิมเกรนของเฟส  $\alpha$ -Al บริเวณเนื้อโลหะเดิมมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม แสดงภาพที่ 4.5 (ค) เฟสซิลิกอนในชิ้นงานที่ผ่านการ Aging ไม่มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง (Alan P.D. et. al, 2001)

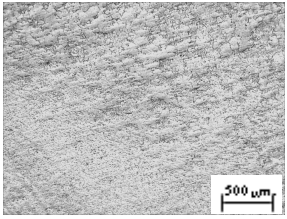
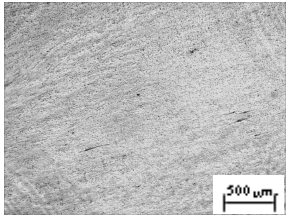
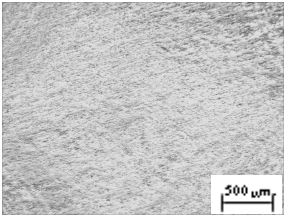
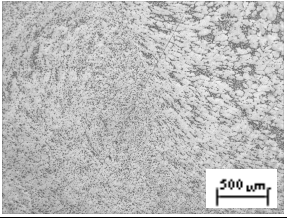
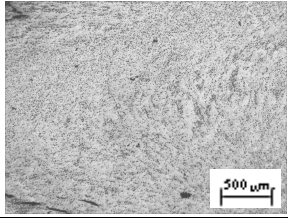
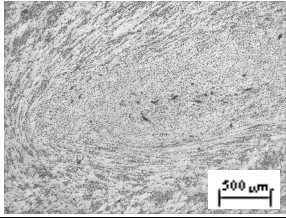
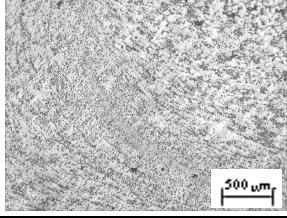
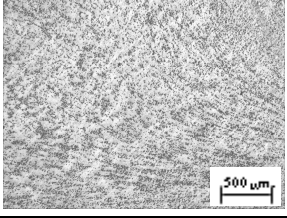
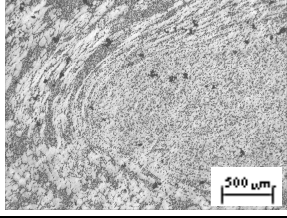


ภาพที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิม (ก) บริเวณเนื้อโลหะเดิมของสภาวะทางความร้อน T6 (ข) และ บริเวณเนื้อโลหะเดิมของสภาวะทางความร้อน Artificially aged (ค)

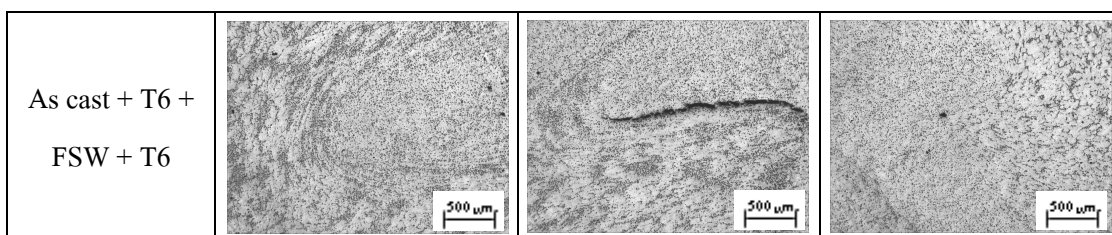
#### 4.3.2 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min

จากภาพที่ 4.6 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min จากกล้อง OM และสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน สเกลจากภาพ 500  $\mu$ m พบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้ออะลูมิเนียมเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและเฟส Eutectic โครงสร้างมีการประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของเนื้ออะลูมิเนียมทั้งสองชิ้น อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินและแรงกดทำให้เกิดความร้อนเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้ออะลูมิเนียม จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยเชื่อม โดยเฉพาะรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + FSW และ As cast +

T6 + FSW) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating Side จะเกิดความแตกต่างจากโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณที่ถูกกวนเป็นลักษณะของโครงสร้างที่ค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน Retreating Side มีทิศทางการเดินแนวเชื่อมตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของ Tool และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing Side มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน Retreating Side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาว ตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน Advancing Side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม ส่วนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6) เกิดรอยแตกร้าว (Crack) อย่างไรก็ตามบริเวณที่ถูกกวนของทั้งสี่แบบแนวเชื่อมจากการสังเกตไม่พบว่าโครงสร้างจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เพราะว่าโครงสร้างลักษณะที่ละเอียดมาก

| สภาวะทางความร้อน   | โครงสร้างจุลภาค   |  |   |
|--------------------|---|--|---|
|                    | TMAZ Retreating   | SZ   | TMAZ Advancing  |
| As cast + FSW      |  |  |  |
| As cast + T6 + FSW |  |  |  |
| As cast + FSW + T6 |  |  |  |



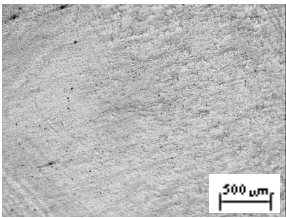
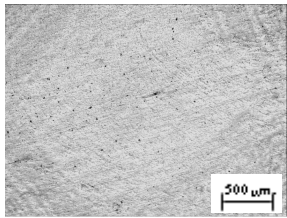
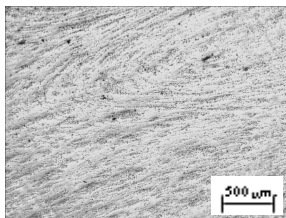
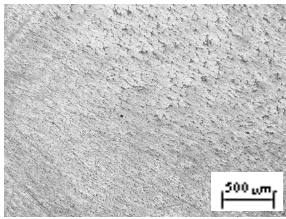
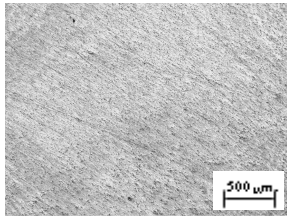
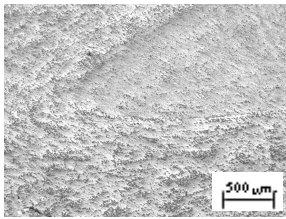
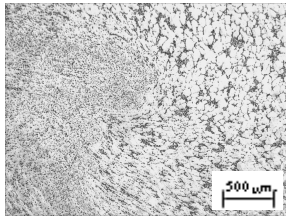
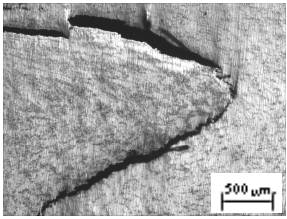
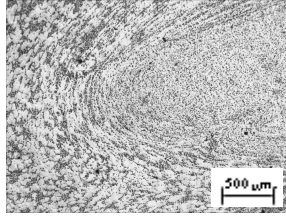
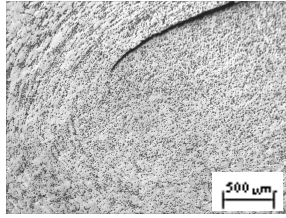
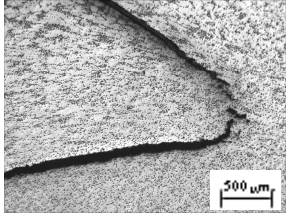
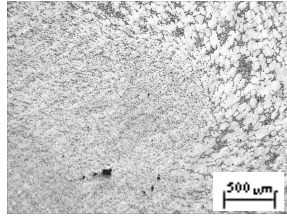


ภาพที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min

#### 4.3.3 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min

จากภาพที่ 4.7 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min จากกล้อง OM และสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน สเกลจากภาพ 500  $\mu\text{m}$  พบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียม เมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้ออะลูมิเนียมเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและเฟส Eutectic โครงสร้างมีการประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของเนื้ออะลูมิเนียมทั้งสองชิ้น อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินและแรงกดทำให้เกิดความร้อนเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้ออะลูมิเนียม จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยเชื่อม โดยเฉพาะรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + FSW และ As cast + T6 + FSW) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating Side จะเกิดความแตกต่างจากโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณที่ถูกกวนเป็นลักษณะของโครงสร้างที่ค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน Retreating Side มีทิศทางการเดินแนวเชื่อมตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของ Tool และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing Side มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน Retreating Side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาว ตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน Advancing Side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม ส่วนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6) เกิดรอยแตกร้าว (Crack) อย่งไรก็ตามบริเวณที่ถูกกวนของทั้งสี่แบบแนวเชื่อมจากการสังเกตดูไม่พบว่าโครงสร้างจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เพราะว่าโครงสร้างลักษณะที่ละเอียดมาก



| สภาวะทางความร้อน        | โครงสร้างจุลภาค   |  |   |
|-------------------------|---|--|---|
|                         | TMAZ Retreating   | SZ   | TMAZ Advancing  |
| As cast + FSW           |    |    |    |
| As cast + T6 + FSW      |    |    |    |
| As cast + FSW + T6      |   |   |   |
| As cast + T6 + FSW + T6 |  |  |  |

ภาพที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min

#### 4.3.4 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาครอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน

จากการวิเคราะห์โดยใช้กล้อง OM ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัณดังภาพที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคในสภาวะทางความร้อน T6 ก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณเนื้อโลหะเดิมเกรนของเฟส  $\alpha$ -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อนึ่งกันมีเฟส Si ลักษณะละเอียดกระจัดกระจายอย่าง

ไม่เป็นระเบียบรอบเฟส  $\alpha$ -Al มีการแพร่ของซิลิกอนออกจากเฟสยูเทคติกซิลิกอนและละลายเข้าสู่อะลูมิเนียมเมตริกซ์ (Akhter R. et al., 2007; Moller H. et al., nd.) โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน (Elangovan K. and Balasubramanian V. et al., 2007 ; Ma Z.Y. et al., 2006 ; Kim Y.G. et al., 2005) อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้ออะลูมิเนียมทำให้เกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและเฟส Eutectic จากการสังเกตบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) จะมีลักษณะที่ละเอียดและเรียบมากกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) เล็กน้อย อันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของอะลูมิเนียมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) มีมากกว่าที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่มีการประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของเนื้ออะลูมิเนียมทั้งสองชั้น (Lee W.B. et al., 2003) เนื่องจากการกวนของหัวพินและแรงกดทำให้เกิดความร้อนเนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้ออะลูมิเนียมรอบตัวกวน จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยเชื่อม โดยเฉพาะรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + FSW และ As cast + T6 + FSW) ส่วนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6) จะเกิดรอยแตกร้าว (Crack) เป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน (Chen Y.C. et al., 2005) ซึ่งการแตกของแนวเชื่อมเกิดขึ้นในระหว่างการชุบน้ำหลังจากขั้นตอนกระบวนการอบละลาย (Solution Treatment) ที่อุณหภูมิ 540°C จากการสังเกตบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) จะมีลักษณะรอยแตกร้าวมากกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) อันเนื่องมาจากรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) มีความแข็งของรอยเชื่อมมากกว่าค่าความแข็งแนวเชื่อมแสดงดังภาคผนวก ค เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนและชุบน้ำทันที จะทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งสูงขึ้นไปอีกจนเกิดการแตกร้าวในที่สุด จากภาพที่ 4.6 และ 4.7 บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลของหัวพินทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ด้าน Retreating Side จะเกิดความแตกต่างของโครงสร้างเนื้อโลหะเดิมและบริเวณที่ถูกกวนเป็นลักษณะของโครงสร้างที่ค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัดเนื่องจากด้าน Retreating Side มีทิศทางการเดินแนวเชื่อมตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของ Tool และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing Side มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน Retreating Side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาว ตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจาก

ด้าน Advancing Side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม

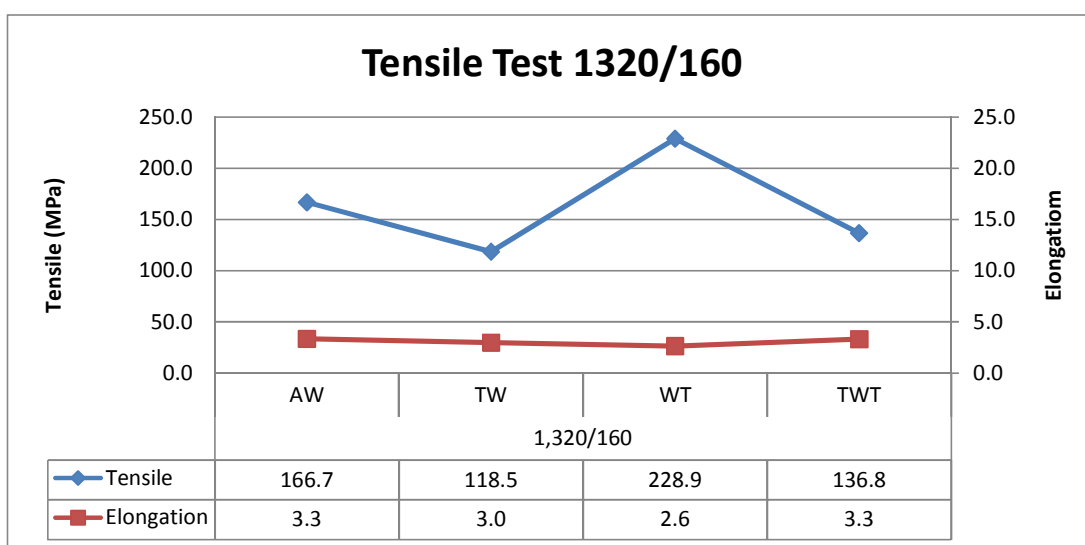
#### 4.4 การทดสอบความแข็งแรงดึง

รอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่กำหนดคือ As cast + FSW, As cast + T6 + FSW, As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6 ที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม โดยให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบนำไปทำชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (E8) แสดงในภาคผนวก ก และทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง โดยแสดงดังภาพที่ 4.8-4.9 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ซึ่งข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก ง

##### 4.4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm 160 mm/min

จากการทดลองพบว่า ที่สภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (W+T6) มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 228.92 MPa มีค่ามากกว่าทุกสภาวะทางความร้อน โดยมากกว่าของสภาวะเชื่อมอย่างเดียวที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (As cast + FSW) 62.24 MPa หรือคิดเป็น 37.34% ส่วนค่าความยืดตัวมีค่าต่ำที่สุดในทุกสภาวะทางความร้อน คือ 2.64 % ค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุด คือ 118.46 MPa ที่สภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) โดยมีค่าความยืดตัว คือ 2.98 % จากภาพที่ 4.8 เห็นว่าสภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าสภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม เนื่องจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) ก่อนการเชื่อมทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเชื่อมในตัวแปรที่กำหนดไว้ทำให้แรงกดและความร้อนจากการเสียดทานน้อยลง ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงต่ำลง แต่เมื่ออยู่ในสภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงสุด เนื่องจากชิ้นงานได้เชื่อมในตัวแปรที่เหมาะสม ขนาดของอนุภาคของ Si หลังจากกระบวนการทางความร้อน (T6) มีลักษณะการกระจายตัวอย่างระจัดกระจายทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ทั้งที่ปรากฏรอยแตกในบริเวณรอยเชื่อม อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในสภาวะทางความร้อนทั้งก่อนและหลังการเชื่อม (As cast + T6 + FSW + T6) ค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับสภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) และต่ำกว่าสภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม

(As cast + FSW + T6) เนื่องจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) ก่อนการเชื่อมทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและประกอบกับรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมจากกระบวนการทางความร้อน (T6) หลังการเชื่อม

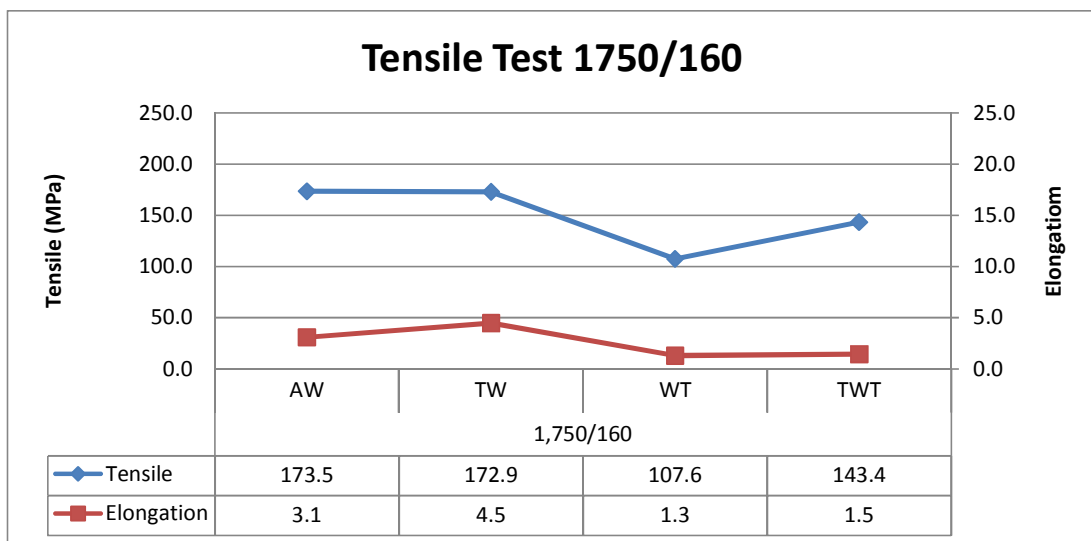


ภาพที่ 4.8 กราฟค่าความแข็งแรงดึงงานเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min

#### 4.4.2 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm 160 mm/min

จากการทดลองพบว่า ที่สภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 172.93 MPa มีค่ามากกว่าทุกสภาวะทางความร้อน แต่น้อยกว่าของสภาวะเชื่อมที่ไม่กระบวนการทางความร้อน (As cast + FSW) 0.55 MPa หรือคิดเป็น 0.32% ส่วนค่าความยืดตัวมีค่าสูงที่สุดในทุกสภาวะทางความร้อน คือ 4.47 % ค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดคือ 107.59 MPa ที่สภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) โดยมีค่าความยืดตัวคือ 1.30 % จากภาพที่ 4.9 เห็นว่าสภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าสภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม เนื่องจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) ก่อนการเชื่อมทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเชื่อมในตัวแปรที่กำหนดไว้ทำให้แรงกดและความร้อนจากการเสียดทานเหมาะสม ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น แต่เมื่อดูในสภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าต่ำสุด เนื่องจากรอยแตกที่ปรากฏในบริเวณรอยเชื่อมมาก ต่อเนื่อง และกระจุกกระจายทั่วบริเวณรอยเชื่อม ทำให้ค่าความ

แข็งแรงดิ่งต่ำลง อย่างไรก็ตามเมื่อดูในสภาวะทางความร้อนทั้งก่อนและหลังการเชื่อม (As cast + T6 + FSW + T6) ค่าความแข็งแรงดิ่งใกล้เคียงกับสภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) และต่ำกว่าสภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) เนื่องจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) ก่อนการเชื่อมทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและประกอบกับรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมจากกระบวนการทางความร้อน (T6) หลังการเชื่อม

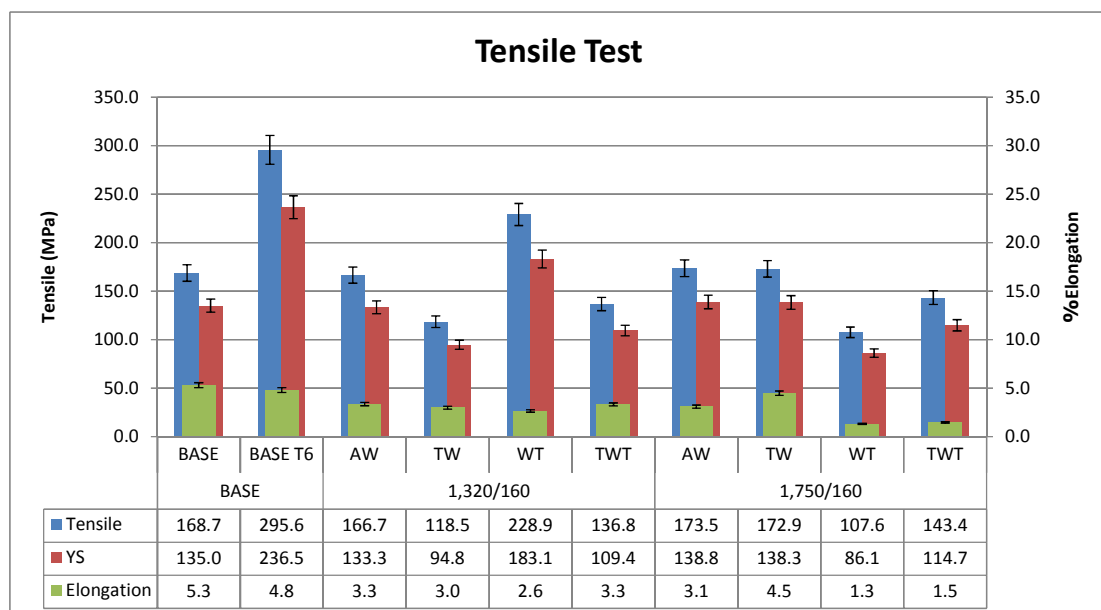


ภาพที่ 4.9 กราฟค่าความแข็งแรงดิ่งงานเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min

#### 4.4.3 วิเคราะห์ความแข็งแรงดิ่งรอยเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองพบว่า ที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) สภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) มีค่าความแข็งแรงดิ่งมากที่สุด คือ 228.92 MPa แต่ในสภาวะที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) สภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) กลับมีค่าความแข็งแรงดิ่งน้อยที่สุดของการทดลอง คือ 107.59 MPa แสดงดังภาพที่ 4.10 เนื่องมาจากกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) จะทำให้ปรากฏรอยแตก (Crack) ในบริเวณรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) มีความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากกว่าที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) ค่าความแข็งแรงแนวเชื่อมแสดงดังภาคผนวก ค เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนและชุบน้ำ

ทันที จะทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้นไปอีกจนเกิดการแตกร้าวในที่สุด ซึ่งในสภาวะที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) จะปรากฏรอยแตกมากกว่าสภาวะที่ความเร็วหมุนของหัวพิน 1,320 rpm จึงทำให้มีค่าแรงดึงต่ำกว่า ส่วนที่สภาวะที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) สภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) มีค่าความแข็งแรงดึงคือ 172.93 MPa มากกว่าค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) สภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึง คือ 118.46 MPa เนื่องจากกระบวนการทางความร้อน (T6) ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เมื่อสังเกตในสภาวะของความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) ทำให้ความร้อนจากการเสียดทานลดน้อยลงส่งผลต่อค่าแรงดึง แต่ในสภาวะของความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) ทำให้ความร้อนจากการเสียดทานและการหมุนวนของเนื้ออะลูมิเนียมเข้ากันได้ดี ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) จะต้องเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) จึงจะได้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด ส่วนชิ้นงานที่ต้องเชื่อมก่อนแล้วนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) จะต้องเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) จึงจะได้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด อีกทั้งในส่วนของสภาวะทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (As cast + T6 + FSW + T6) มีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกันและต่ำกว่าในสภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) เนื่องจากปรากฏรอยแตกบริเวณแนวเชื่อมอย่างชัดเจนและมีปริมาณมาก



ภาพที่ 4.10 กราฟค่าความแข็งแรงดึง ที่ 1,320, 1,750 rpm และ 160 mm/min

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมในสภาวะต่างๆกับเนื้อโลหะเดิม ทั้ง 4 สภาวะ แสดงดังตารางที่ 4.1 คือ เนื้อโลหะเดิม (Base) และเนื้อโลหะเดิมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (BASE T6) พบว่า สภาพแนวเชื่อมที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือสภาวะ As cast + FSW + T6 (1,320/160) เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิมมีประสิทธิภาพ 135.7% และเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีประสิทธิภาพ 77.4% ส่วนสภาพแนวเชื่อมที่ต่ำที่สุดของการทดลองนี้คือ สภาวะ As cast + FSW + T6 (1,750/160) เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิมแล้วมีประสิทธิภาพ 63.8% และเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีประสิทธิภาพ 36.4%

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงและประสิทธิภาพของรอยต่อชนกรเชื่อมเสียดทานแบบกวน

| Joint     |     | Yield Strength (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Elongation (%) | Joint Efficiency (BM) (%) | Joint Efficiency (BM T6) (%) |
|-----------|-----|----------------------|------------------------|----------------|---------------------------|------------------------------|
| BM        |     | 134.9                | 168.7                  | 5.3            | -                         | -                            |
| T6        |     | 236.5                | 295.6                  | 4.8            | -                         | -                            |
| 1,320/160 | AW  | 133.3                | 166.7                  | 3.3            | 98.8                      | 56.4                         |
|           | TW  | 94.8                 | 118.5                  | 3.0            | 70.2                      | 40.1                         |
|           | WT  | 183.1                | 228.9                  | 2.6            | 135.7                     | 77.4                         |
|           | TWT | 109.4                | 136.8                  | 3.3            | 81.1                      | 46.3                         |
| 1,750/160 | AW  | 138.8                | 173.5                  | 3.1            | 102.8                     | 58.7                         |
|           | TW  | 138.3                | 172.9                  | 4.5            | 102.5                     | 58.5                         |
|           | WT  | 86.1                 | 107.6                  | 1.3            | 63.8                      | 36.4                         |
|           | TWT | 114.7                | 143.4                  | 1.5            | 85.0                      | 48.5                         |

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ

จากการหาค่าขนาดของตัวอย่างในบทที่ 3 ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ ได้ขนาดตัวอย่าง (Sample Size: n) ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ เท่ากับ 4 ซ้ำ

#### 4.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล โดยการตรวจสอบจากความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยค่าแรงดึงของค่าความแข็งแรงสูงสุดเฉลี่ย แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

| ลำดับ<br>ที่ | สถานะการ<br>ทดลอง | ความแข็งแรงสูงสุด (MPa) |            |            |            | Mean  | SD   |
|--------------|-------------------|-------------------------|------------|------------|------------|-------|------|
|              |                   | ครั้งที่ 1              | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 |       |      |
| 1            | 1,320:160 AW      | 165.4                   | 167.8      | 166.8      | 166.6      | 166.7 | 0.98 |
| 2            | 1,320:160 TW      | 119.4                   | 118.4      | 117.2      | 118.8      | 118.5 | 0.93 |
| 3            | 1,320:160 WT      | 228.3                   | 227.8      | 229.5      | 229.9      | 228.9 | 0.99 |
| 4            | 1,320:160 TWT     | 137.6                   | 137.2      | 135.5      | 136.8      | 136.8 | 0.91 |
| 5            | 1,750:160 W       | 174.4                   | 173.5      | 173.7      | 172.4      | 173.5 | 0.83 |
| 6            | 1,750:160 TW      | 173.5                   | 172.6      | 173.2      | 172.1      | 172.9 | 0.62 |
| 7            | 1,750:160 WT      | 106.2                   | 108.5      | 107.9      | 107.7      | 107.6 | 0.98 |
| 8            | 1,750:160 TWT     | 144.2                   | 143.3      | 143.8      | 142.3      | 143.4 | 0.82 |

AW : As cast + FSW, TW : As cast + T6 + FSW, WT : As cast + FSW + T6 และ TWT : As cast + T6 + FSW + T6

#### 4.5.2 การตั้งสมมุติฐานการทดลอง

Main Effect

ทดสอบสมมุติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบของเครื่องมือ

กำหนดให้  $\alpha_1, \alpha_2$  คือ ความเร็วหมุนหัวพินที่ 1,320 และ 1,750 rpm ตามลำดับ

$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2$  สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \alpha_1 \neq \alpha_2$  สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน



ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัยสภาวะทางความร้อน

กำหนดให้  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  คือ ปัจจัยสภาวะทางความร้อน As cast + FSW, As cast + T6 + FSW, As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6 ตามลำดับ

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4$  สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัยสภาวะทางความร้อนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4$  สำหรับบางระดับ อิทธิพลของปัจจัยสภาวะทางความร้อนแตกต่างกัน

Factor Interaction Effect

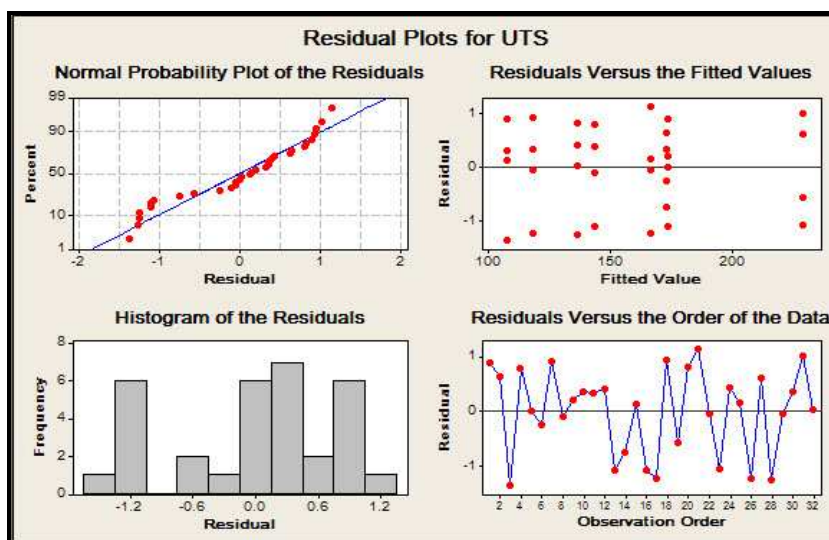
ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและปัจจัยสภาวะทางความร้อน

$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0$  for all  $i, j$  ทุกระดับ  $i, j$  ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ( $i = 1, 2; j = 1, 2, 3$ )

$H_1 : \text{at least one } (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$  มีบาง  $i, j$  มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ( $i = 1, 2; j = 1, 2, 3$ )

#### 4.5.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำการคำนวณค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ ได้ผลการคำนวณต่างๆ ดังนี้

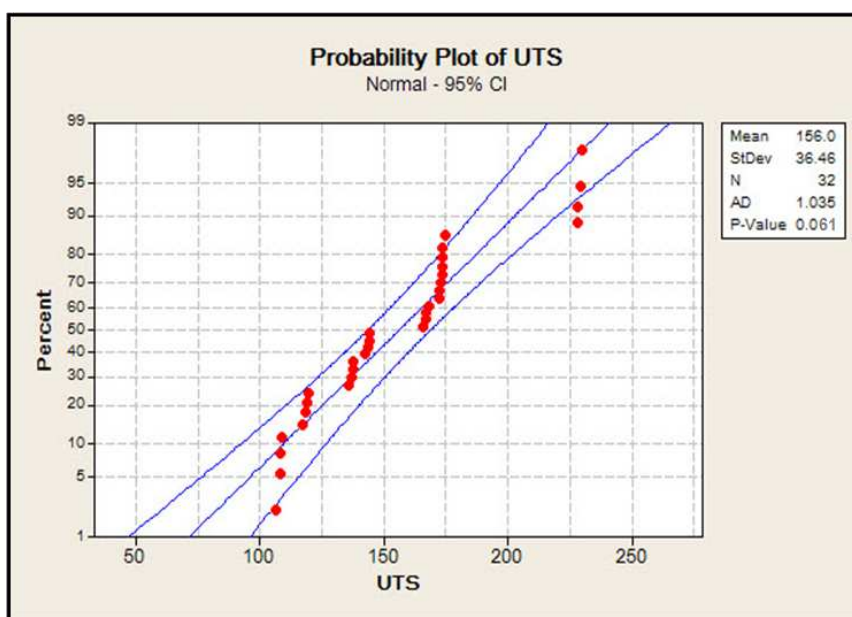


ภาพที่ 4.11 กราฟการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม เป็นเส้นตรง และการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ในลักษณะใด เพื่อให้มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองอยู่ภายใต้สภาวะการควบคุมโดยพิจารณา ดังนี้

(1) พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยดูจากกราฟ Residual Versus the Order of the Data จากภาพที่ 4.11 (Model Adequacy Checking) เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่จากลักษณะของจุดที่ควรให้ความสำคัญจากภาพที่ 4.11 ดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม

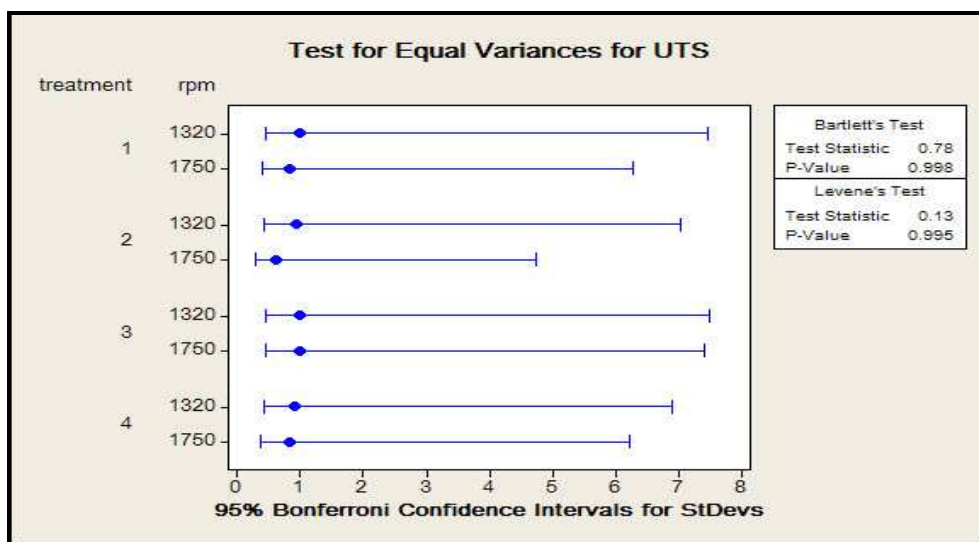
(2) พิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรง เนื่องจากข้อมูลมีมากกว่า 30 ตัว จึงพิจารณาจาก Normal Probability Plot of the Residuals ดังภาพที่ 4.11 จาก Model Adequacy Checking จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้นทำให้ไม่มั่นใจในการกระจายตัวของข้อมูล จึงได้มีการทดสอบ Normal Probability แสดงดังภาพที่ 4.12 จากข้อกำหนด  $\alpha = 0.05$  จากกราฟได้ค่า P -Value = 0.061 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ  $\alpha = 0.05$



ภาพที่ 4.12 กราฟลักษณะการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล

(3) พิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์ ลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกันมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์จาก (Model Adequacy Checking) ดังภาพที่ 4.11 กราฟแสดง

ลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values ที่ได้มีบางค่าที่กระจายตัวออกห่างจากจุดศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลอง มีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน แสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

จากภาพที่ 4.13 แสดงช่วงความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของรอยเชื่อมจากปัจจัยต่างๆ เหลื่อมกัน แสดงว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 8 ครั้ง ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทดสอบได้ดังนี้

ทดสอบความแตกต่างกันของความแปรปรวน จากสมมติฐาน

กำหนดให้  $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2, \sigma_5^2, \sigma_6^2, \sigma_7^2, \sigma_8^2$  คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูล

$H_0 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2 = \sigma_7^2 = \sigma_8^2$  ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 8 เท่ากัน

$H_1 = \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2 \neq \sigma_6^2 \neq \sigma_7^2 \neq \sigma_8^2$  ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 8 ไม่เท่ากัน

ทดสอบสมมติฐาน ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้ดังภาพที่ 4.13 ค่า P-Value = 0.998 มีค่ามากกว่า  $\alpha = 0.05$  แสดงว่าสัดส่วนของความแปรปรวนในภาพ F มีค่าน้อย ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 8 ครั้ง จึงมีค่าเท่ากัน หรือมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA

| Two-way ANOVA: UTS versus rpm, treatment |    |         |         |          |       |
|--|----|---------|---------|----------|-------|
| Source                                   | DF | SS      | MS      | F        | P     |
| rpm                                      | 1  | 1427.1  | 1427.1  | 1799.59  | 0.000 |
| treatment                                | 3  | 5663.1  | 1887.7  | 2380.39  | 0.000 |
| Interaction                              | 3  | 34100.6 | 11366.9 | 14333.63 | 0.000 |
| Error                                    | 24 | 19.0    | 0.8     |          |       |
| Total                                    | 31 | 41209.8 |         |          |       |

S = 0.8905    R-Sq = 99.95%    R-Sq(adj) = 99.94%

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งแรงดึงตามปัจจัยต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 99.95% หมายความว่า ความผันแปรต่างๆของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่างๆที่กำหนดให้คงที่ ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 99.95% ส่วนที่เหลือประมาณ 0.05% เกิดจากปัจจัยต่างๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) ดังนั้นการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

#### 4.5.4 ทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

อิทธิพลของความเร็รรอบ ความเร็วในการเดินแนววงและอันตรกิริยา มีผลต่อความแข็งแรงดึง

##### (1) Main Effect

ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็รรอบ

$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2$  สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็รรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \alpha_1 \neq \alpha_2$  สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็รรอบแตกต่างกัน

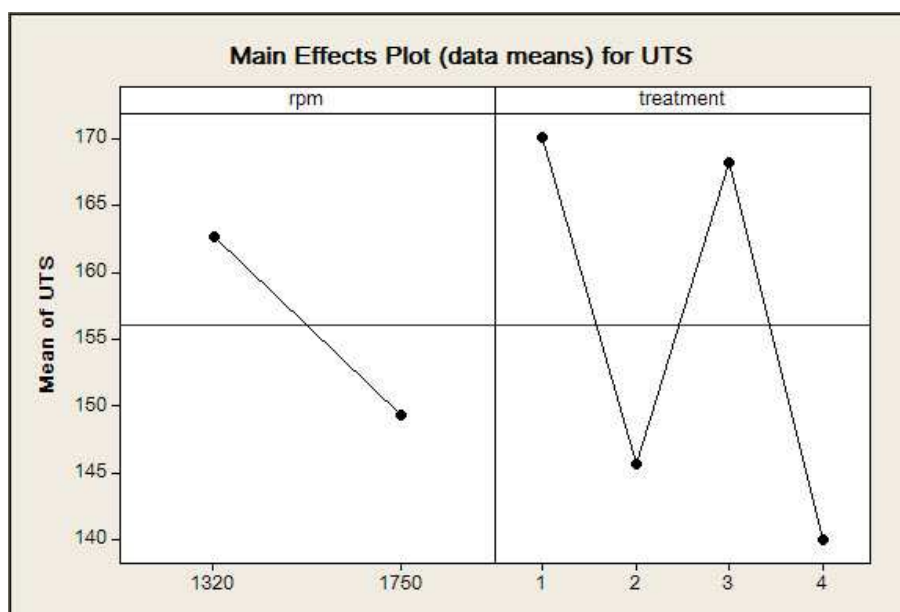
จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ  $H_0$  เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha ( $\alpha$ ) = 0.05 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยความเร็รรอบ มีผลต่อความแข็งแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัยสถานะทางความร้อน

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4$  สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัยสถานะทางความร้อนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4$  สำหรับบางระดับ อิทธิพลของปัจจัยสถานะทางความร้อนแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ  $H_0$  เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha  $\alpha = 0.05$  ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยสถานะทางความร้อนมีผลต่อความแข็งแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับความเร็รรอบและปัจจัยสถานะทางความร้อน

ความเร็รรอบและสถานะทางความร้อนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึง จากภาพที่ 4.14 จะเห็นว่าที่ความเร็รรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าน้อยลงด้วย ส่วนที่ปัจจัยสถานะทางความร้อนนั้นการทำ T6 ก่อนแล้วนำไปเชื่อมจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าการทำ T6 หลังจากการเชื่อม ซึ่งพบว่า การเชื่อมอย่างเดียวให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ส่วนเชื่อมแล้วทำ T6 ให้ค่าความแข็งแรงดึงรองลงมา ส่วนการทำ T6 แล้วนำไปเชื่อมแล้วนำไปทำ T6 ซ้ำอีก มีค่าน้อยที่สุด

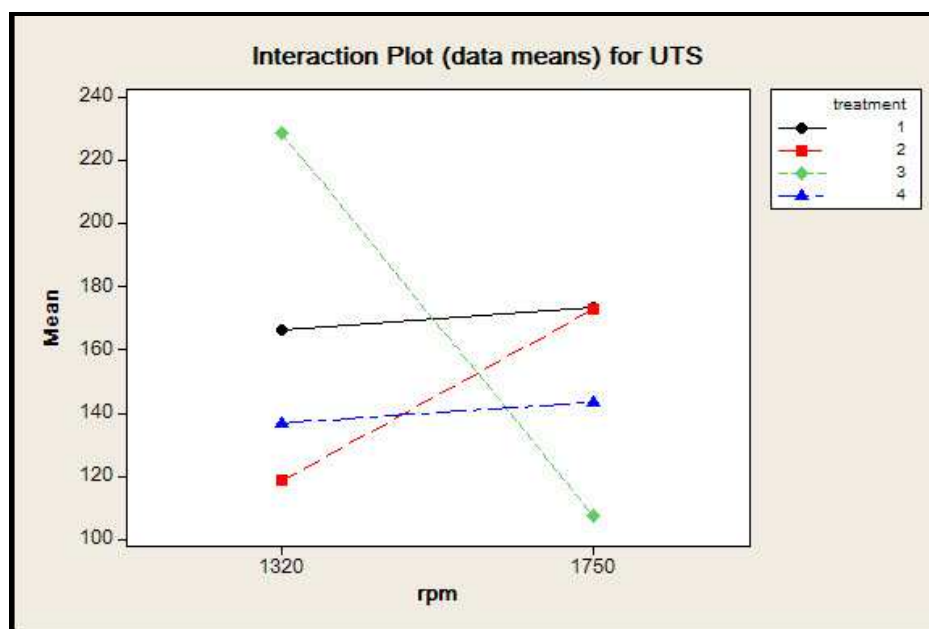
## (2) Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและปัจจัยสถานะทางความร้อน

$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0$  for all  $i, j$  ทุกระดับ  $i, j$  ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ( $i = 1, 2; j = 1, 2, 3$ )

$H_1 : \text{at least one } (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$  มีบาง  $i, j$  มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ( $i = 1, 2; j = 1, 2, 3$ )

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาด้วย ANOVA ปฏิเสธ  $H_0$  เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha  $\alpha = 0.05$  ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่ามีอิทธิพลของอันตรกิริยา ระหว่างความเร็วรอบกับสถานะทางความร้อนมีผลต่อความแข็งแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 4.15 อันตรกิริยา ค่าความแข็งแรงกับความเร็วในการเชื่อม

จากภาพที่ 4.15 กราฟแสดง Interaction มีอิทธิพลต่อการทดลอง ระหว่างปัจจัยของความเร็วรอบและสถานะทางความร้อน การเพิ่มความเร็วรอบจาก 1,320 เป็น 1750 rpm พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นทุกสถานะทางความร้อนยกเว้นที่สถานะทางความร้อนของการเชื่อมแล้วนำไปทำ T6 มีค่าลดลง โดยที่สถานะทางความร้อนนี้ที่ 1750 rpm ให้ค่าแรงดึงต่ำที่สุด ส่วนที่ความเร็วรอบ 1320 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด จะเห็นได้ว่าการแปรผกผันกันของค่าความแข็งแรงดึงดังนั้นมี Interaction ระหว่างปัจจัยของความเร็วรอบ และปัจจัยของสถานะทางความร้อน

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า ข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ ความแปรปรวนของความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากปัจจัยต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 8 ครั้ง ไม่มีความแตกต่างกันและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 99.95% อธิบายได้ว่าผลจากการเปลี่ยนความเร็วรอบและสภาวะทางความร้อนในการเชื่อม มีความแข็งแรง 99.95 ส่วน

การวิเคราะห์ตาราง ANOVA เมื่อกำหนดให้  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05 พิจารณาอันตรกิริยา AB ค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ทำให้สรุปได้ว่าอันตรกิริยา มีอิทธิพลต่อผลการทดลองในส่วน of ปัจจัยหลักคือ ความเร็วรอบ ค่า P-Value น้อยกว่า 0.000 และสภาวะทางความร้อนในการเชื่อม ค่า P-Value เท่ากับ 0.000 สรุปได้ว่า ทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### 4.5.5 การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Fisher

(1) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm กำหนดให้  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$  คือ สภาวะกระบวนการทางความร้อนที่ 1,320<sub>AW</sub>, 1,320<sub>TW</sub>, 1,320<sub>WT</sub> และ 1,320<sub>TWT</sub> ตามลำดับ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 4 ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$  อย่างน้อย 1 คู่ โดยที่  $i \neq j$

จากสูตรคำนวณที่ 2.10 ต้องหาค่า  $MS_E$  จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวน One Way ANOVA แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดง ANOVA ของการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm

| One-way ANOVA: UTS1320 versus treat4 |    |          |         |          |       |
|--------------------------------------|----|----------|---------|----------|-------|
| Source                               | DF | SS       | MS      | F        | P     |
| treat4                               | 3  | 28099.60 | 9366.53 | 10297.61 | 0.000 |
| Error                                | 12 | 10.91    | 0.91    |          |       |
| Total                                | 15 | 28110.52 |         |          |       |

S = 0.9537    R-Sq = 99.968    R-Sq (adj) = 99.958

แทนค่าลงในสูตร โดยที่  $\alpha/2 = 0.025$ ,  $N=16$ ,  $a=4$ ,  $n=4$  และ  $MS_E=0.91$

$$\begin{aligned} \text{LSD} &= t_{0.025, 12} \sqrt{\frac{2(0.9)}{4}} \\ &= 1.47 \end{aligned}$$

คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย  $\bar{X}_i - \bar{X}_j$  โดยค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.2

- 1)  $|1,320_{\text{AW}} - 1,320_{\text{TW}}|$  แทนค่า  $|166.7 - 118.5| = 48.2$
- 2)  $|1,320_{\text{AW}} - 1,320_{\text{WT}}|$  แทนค่า  $|166.7 - 228.9| = 62.2$
- 3)  $|1,320_{\text{AW}} - 1,320_{\text{TWT}}|$  แทนค่า  $|166.7 - 136.8| = 29.9$
- 4)  $|1,320_{\text{TW}} - 1,320_{\text{WT}}|$  แทนค่า  $|118.5 - 228.9| = 110.4$
- 5)  $|1,320_{\text{TW}} - 1,320_{\text{TWT}}|$  แทนค่า  $|118.5 - 136.8| = 18.3$
- 6)  $|1,320_{\text{WT}} - 1,320_{\text{TWT}}|$  แทนค่า  $|228.9 - 136.8| = 92.1$

เมื่อ AW: As cast + FSW, TW: As cast + T6 + FSW, WT: As cast + FSW + T6

และ TWT: As cast + T6 + FSW + T6

นำค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$  เปรียบเทียบกับ ค่า LSD ถ้า ค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > \text{ค่า LSD}$  แสดงว่า  $\mu_i \neq \mu_j$  แต่ถ้า ค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq \text{ค่า LSD}$  แสดงว่า  $\mu_i = \mu_j$

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ความเร็วในการหมุนของหัวฟัน 1,320 rpm ขอมรับ  $H_0$  หมายความว่า ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทุกสภาวะทางความร้อนที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

(2) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ความเร็วในการหมุนของหัวฟัน 1,750 rpm

กำหนดให้  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$  คือ สภาวะกระบวนการทางความร้อนที่ 1,750<sub>AW</sub>, 1,750<sub>TW</sub>, 1,750<sub>WT</sub> และ 1,750<sub>TWT</sub> ตามลำดับ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 4 ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$  อย่างน้อย 1 คู่ โดยที่  $i \neq j$

จากสูตรคำนวณที่ 2.10 ต้องหาค่า  $MS_E$  จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวน One Way ANOVA แสดงดังตารางที่ 4.4



ตารางที่ 4.5 แสดง ANOVA ของการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm

| One-way ANOVA: UTS1750 versus treat3              |    |          |         |         |       |
|---|----|----------|---------|---------|-------|
| Source  | DF | SS       | MS      | F       | P     |
| treat3  | 3  | 11664.10 | 3888.03 | 5747.63 | 0.000 |
| Error   | 12 | 8.12     | 0.68    |         |       |
| Total   | 15 | 11672.21 |         |         |       |
| S = 0.8225    R-Sq = 99.93%    R-Sq(adj) = 99.91% |    |          |         |         |       |

แทนค่าลงในสูตร โดยที่  $\alpha/2 = 0.025$ ,  $N=16$ ,  $a=4$ ,  $n=4$  และ  $MS_E=0.68$

$$\begin{aligned} \text{LSD} &= t_{0.025, 12} \sqrt{\frac{2(0.68)}{4}} \\ &= 1.27 \end{aligned}$$

คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย  $\bar{X}_i - \bar{X}_j$  โดยค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.2

- 1)  $|1,750_{AW} - 1,750_{TW}|$  แทนค่า  $|173.5 - 172.9| = 0.6$
- 2)  $|1,750_{AW} - 1,750_{WT}|$  แทนค่า  $|173.5 - 107.6| = 65.9$
- 3)  $|1,750_{AW} - 1,750_{TWT}|$  แทนค่า  $|173.5 - 143.4| = 30.1$
- 4)  $|1,750_{TW} - 1,750_{WT}|$  แทนค่า  $|172.9 - 107.6| = 65.3$
- 5)  $|1,750_{TW} - 1,750_{TWT}|$  แทนค่า  $|172.9 - 143.4| = 29.5$
- 6)  $|1,750_{WT} - 1,750_{TWT}|$  แทนค่า  $|107.6 - 143.3| = 35.7$

เมื่อ AW: As cast + FSW, TW: As cast + T6 + FSW, WT: As cast + FSW + T6

และ TWT: As cast + T6 + FSW + T6

นำค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$  เปรียบเทียบกับ ค่า LSD ถ้า ค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > \text{ค่า LSD}$  แสดงว่า  $\mu_i \neq \mu_j$  แต่ถ้า ค่า  $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq \text{ค่า LSD}$  แสดงว่า  $\mu_i = \mu_j$

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ยอมรับ  $H_0$  หมายความว่า ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทุกสภาวะทางความร้อนที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แตกต่างกันทุกสภาวะทางความร้อน ยกเว้นคู่ที่  $1,750_{AW}$  กับ  $1,750_{TW}$  ปฏิเสธ  $H_0$  หมายความว่า ไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### 4.5.6 การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม

(1) ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + FSW

กำหนดให้  $\mu_1, \mu_2$  คือ สภาวะกระบวนการทางความร้อนที่  $1,320_{AW}$  และ  $1,750_{AW}$  ตามลำดับ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 แตกต่างกัน

กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ( $n_1, n_2 < 30$ ) ทดสอบ โดย t-test ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + FSW

| Paired T-Test and CI: mean1320aw, mean1750aw                                |   |          |         |         |
|---|---|----------|---------|---------|
| Paired T for mean1320aw - mean1750aw  |   |          |         |         |
|   | N | Mean     | StDev   | SE Mean |
| mean1320aw  | 4 | 166.650  | 0.985   | 0.492   |
| mean1750aw  | 4 | 173.500  | 0.829   | 0.414   |
| Difference  | 4 | -6.85000 | 1.53297 | 0.76649 |
| 95% CI for mean difference: (-9.28930, -4.41070)                            |   |          |         |         |
| T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -8.94 P-Value = 0.003 |   |          |         |         |

ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + FSW ปฏิเสธ  $H_0$  หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพราะค่า P-Value น้อยกว่า 0.05

(2) ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + T6 + FSW

กำหนดให้  $\mu_1, \mu_2$  คือ สภาวะกระบวนการทางความร้อนที่ 1,320<sub>TW</sub> และ 1,750<sub>TW</sub>  
ตามลำดับ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 แตกต่างกัน

กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ( $n_1, n_2 < 30$ ) ทดสอบ โดย t-test ผลการทดสอบแสดงดัง  
ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + T6 + FSW

| Paired T-Test and CI: mean1320tw, mean1750tw                                 |   |          |        |         |
|--|---|----------|--------|---------|
| Paired T for mean1320tw - mean1750tw   |   |          |        |         |
|  | N | Mean     | StDev  | SE Mean |
| mean1320tw   | 4 | 118.450  | 0.929  | 0.465   |
| mean1750tw   | 4 | 172.850  | 0.624  | 0.312   |
| Difference   | 4 | -54.4000 | 1.1402 | 0.5701  |
| 95% CI for mean difference: (-56.2143, -52.5857)                             |   |          |        |         |
| T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -95.42 P-Value = 0.000 |   |          |        |         |

ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุนของ  
หัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + T6 + FSW ปฏิเสธ  $H_0$  หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของ  
การทดลองทั้ง 2 แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพราะค่า P-Value น้อยกว่า 0.05

(3) ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุน  
ของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + FSW + T6

กำหนดให้  $\mu_1, \mu_2$  คือ สภาวะกระบวนการทางความร้อนที่ 1,320<sub>WT</sub> และ 1,750<sub>WT</sub>  
ตามลำดับ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 แตกต่างกัน

กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ( $n_1, n_2 < 30$ ) ทดสอบ โดย t-test ผลการทดสอบแสดงดัง  
ตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + FSW + T6

| Paired T-Test and CI: mean1320wt, mean1750wt                                 |   |         |       |         |
|--|---|---------|-------|---------|
| Paired T for mean1320wt - mean1750wt   |   |         |       |         |
|  | N | Mean    | StDev | SE Mean |
| mean1320wt   | 4 | 228.875 | 0.988 | 0.494   |
| mean1750wt   | 4 | 107.575 | 0.978 | 0.489   |
| Difference   | 4 | 121.300 | 1.359 | 0.679   |
| 95% CI for mean difference: (119.138, 123.462)                               |   |         |       |         |
| T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 178.52 P-Value = 0.000 |   |         |       |         |

ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + T6 + FSW ปฏิเสธ  $H_0$  หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพราะค่า P-Value น้อยกว่า 0.05

(4) ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + T6 + FSW + T6

กำหนดให้  $\mu_1, \mu_2$  คือ สภาวะกระบวนการทางความร้อนที่ 1,320<sub>TWT</sub> และ 1,750<sub>TWT</sub> ตามลำดับ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 แตกต่างกัน

กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ( $n_1, n_2 < 30$ ) ทดสอบโดย t-test ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่สภาวะ As cast + T6 + FSW + T6

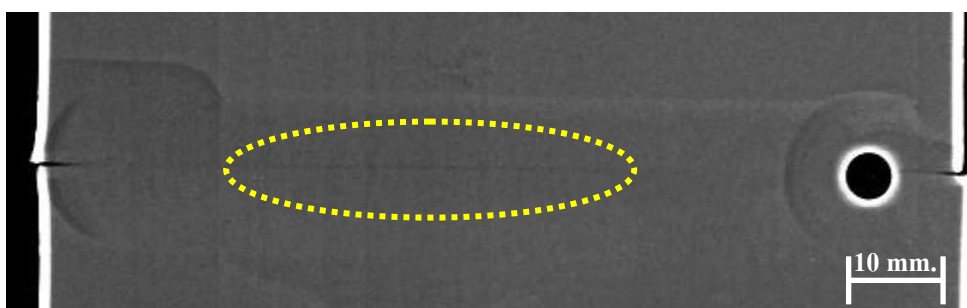
| Paired T-Test and CI: mean1320twt, mean1750twt                              |   |          |         |         |
|---|---|----------|---------|---------|
| Paired T for mean1320twt - mean1750twt                                      |   |          |         |         |
|   | N | Mean     | StDev   | SE Mean |
| mean1320twt   | 4 | 139.275  | 5.099   | 2.549   |
| mean1750twt   | 4 | 143.400  | 0.821   | 0.410   |
| Difference  | 4 | -4.12500 | 5.82659 | 2.91330 |
| 95% CI for mean difference: (-13.39641, 5.14641)                            |   |          |         |         |
| T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -1.42 P-Value = 0.252 |   |          |         |         |

ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ที่สภาวะ As cast + T6 + FSW + T6 ยอมรับ  $H_0$  หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพราะค่า P-Value มากกว่า 0.05

#### 4.6 การเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่องด้วยวิธีการเอ็กซ์เรย์กับเครื่องอัลตราโซนิคแบบการเรียงเฟส

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด A356 ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่กำหนดคือ As cast + FSW, As cast + T6 + FSW, As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6

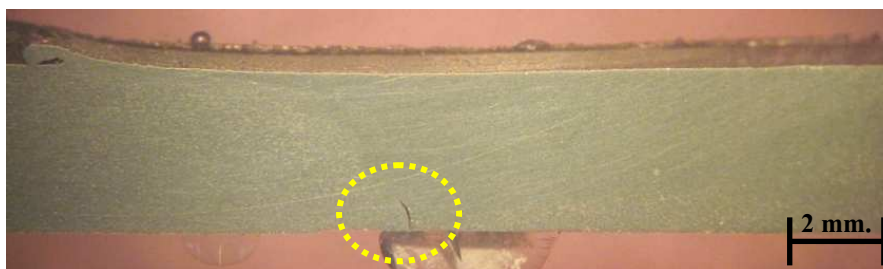
(1) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + FSW เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าพบบริเวณที่มีความบกพร่องเป็นลักษณะแนวเส้นสีดำต่อเนื่องกันตรงกลางแนวเชื่อม มีระยะทางยาวประมาณ 25 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4.16 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิคแบบการเรียงเฟสพบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นลักษณะจุดวงกลมเล็กๆ (สีเขียว) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) สูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.17 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 2.65 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.18 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแยกเล็กๆอยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมมีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม



ภาพที่ 4.16 फिल्मเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW (1,320/160)



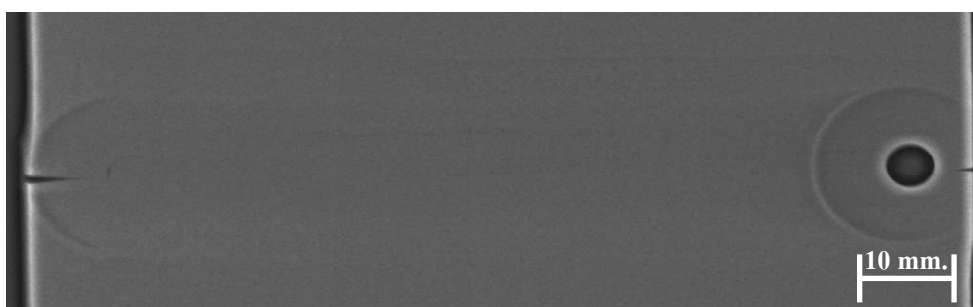
ภาพที่ 4.17 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW (1,320/160)



ภาพที่ 4.18 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW (1,320/160)

2) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + T6 + FSW เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าไม่พบความผิดปกติในแนวเชื่อม แสดงดังภาพที่ 4.19 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสพบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นลักษณะเส้นยาวต่อเนื่องกัน (สีเขียวและสีเหลือง) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) สูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจสอบลงไป

ประมาณ 0.68 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.21 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแยกเล็กๆอยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมมีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นสามารถเชื่อได้ว่าเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีผลที่ดีกว่าการเอ็กซ์เรย์



ภาพที่ 4.19 फिल्मเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW (1,320/160)

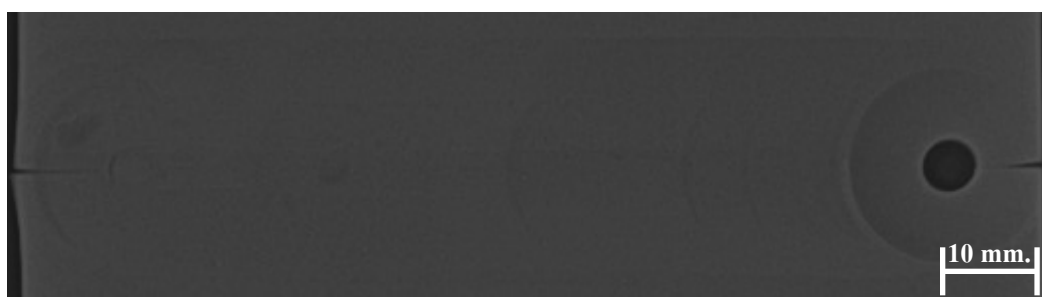


ภาพที่ 4.20 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW (1,320/160)



ภาพที่ 4.21 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW (1,320/160)

3) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + FSW + T6 เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าไม่พบความผิดปกติในแนวเชื่อม แสดงดังภาพที่ 4.22 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสพบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นลักษณะเส้นยาวต่อเนื่องกัน (สีเขียวและสีเหลือง) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) สูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.23 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 3.67 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.24 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแตกแยกอยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Heat Treatment) ดังนั้นสามารถเชื่อได้ว่าเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีผลที่ดีกว่าการเอ็กซ์เรย์



ภาพที่ 4.22 फिल्मเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW + T6 (1,320/160)





ภาพที่ 4.23 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW + T6 (1,320/160)



ภาพที่ 4.24 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW + T6 (1,320/160)

(4) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + T6 + FSW + T6 เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าไม่พบความผิดปกติในแนวเชื่อม แสดงดังภาพที่ 4.25 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส พบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นทั้งลักษณะเส้นยาวต่อเนื่องกัน (สีส้มและสีแดง) และเป็นจุดเล็กๆ กระจายทั่วทั้งบริเวณแนวเชื่อม (สีเขียว) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) ที่กระจัดกระจายไม่

สม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 4.26 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 3.12 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.27 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแตกแยกขนาดใหญ่ตลอดแนวเชื่อมและมีการแตกเล็กๆกระจัดกระจายทั่วทั้งแนวเชื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Heat Treatment) ดังนั้นสามารถเชื่อได้ว่าเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีผลที่ดีกว่าการเอ็กซ์เรย์



ภาพที่ 4.25 फिल्मเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,320/160)

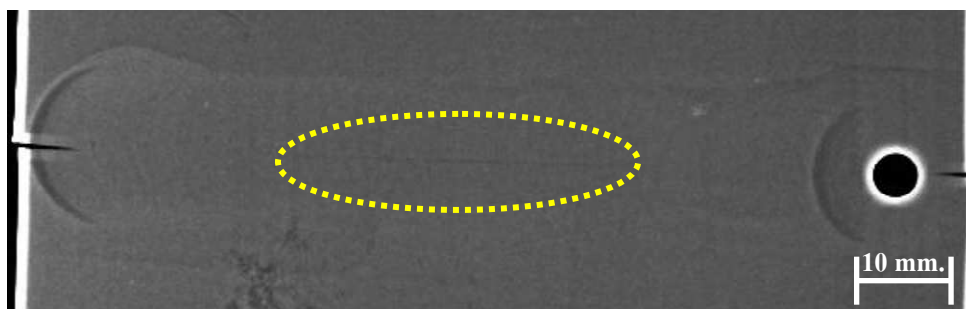


ภาพที่ 4.26 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,320/160)



ภาพที่ 4.27 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,320/160)

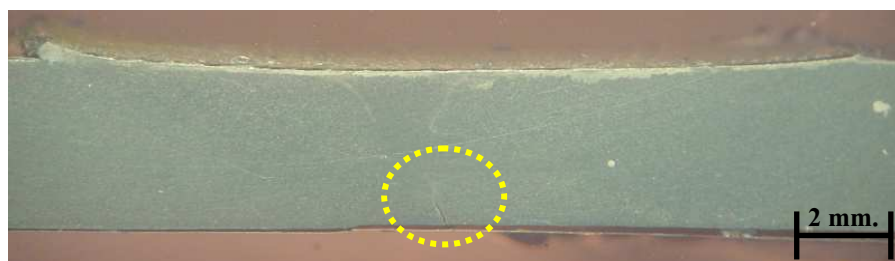
(5) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + FSW เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าพบบริเวณที่มีความบกพร่องเป็นลักษณะแนวเส้นสีดำต่อเนื่องกันตรงกลางแนวเชื่อม มีระยะทางยาวประมาณ 25 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4.28 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสพบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นลักษณะจุดเล็กๆ (สีเขียว) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) สูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.29 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 3.07 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.30 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแยกเล็กๆอยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมประมาณ 1 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.28 फिल्मเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW (1,750/160)



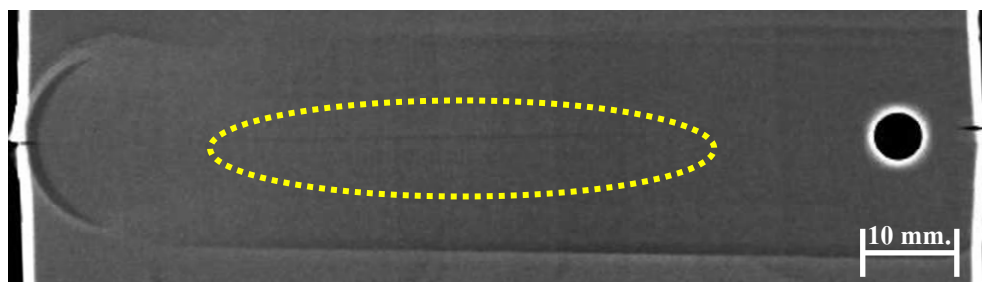
ภาพที่ 4.29 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW (1,750/160)



ภาพที่ 4.30 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW (1,750/160)

(6) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + T6 + FSW เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าพบบริเวณที่มีความบกพร่องเป็นลักษณะแนวเส้นสีดำต่อเนื่องกันตรงกลางแนวเชื่อม มีระยะทางยาวประมาณ 55 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4.31 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสพบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นลักษณะจุดใหญ่ (สีเขียวและสีเหลือง) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) สูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.32 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 3.86

มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.33 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแยกเล็กๆอยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลทั้งสามชนิดตรงกัน



ภาพที่ 4.31 ฟิล์มเอ็กซเรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW (1,750/160)



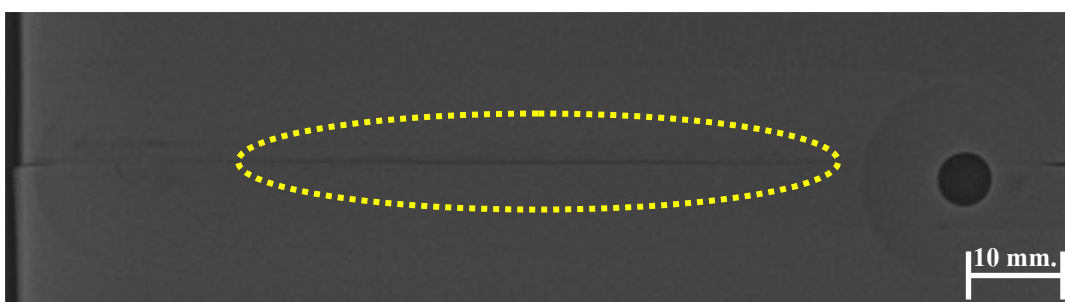
ภาพที่ 4.32 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW (1,750/160)



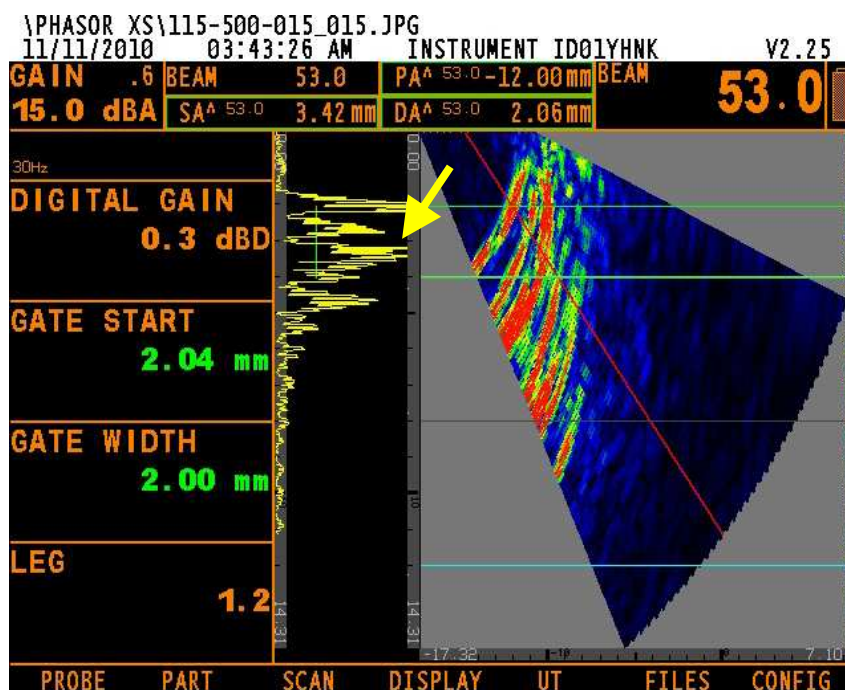


ภาพที่ 4.33 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW (1,750/160)

(7) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + FSW + T6 เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าพบบริเวณที่มีความบกพร่องเป็นลักษณะแนวเส้นสีดำต่อเนื่องกันตรงกลางแนวเชื่อม มีระยะทางยาวประมาณ 60 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4.34 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสพบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นลักษณะจุดใหญ่ (สีเขียวและสีเหลือง) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) สูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.35 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 2.06 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.36 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแตกแยกขนาดใหญ่อยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Heat Treatment)



ภาพที่ 4.34 फिल्मเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + FSW + T6 (1,750/160)



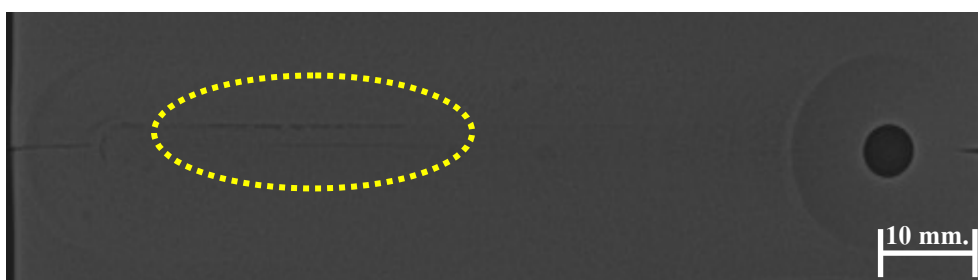
ภาพที่ 4.35 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + FSW + T6 (1,750/160)



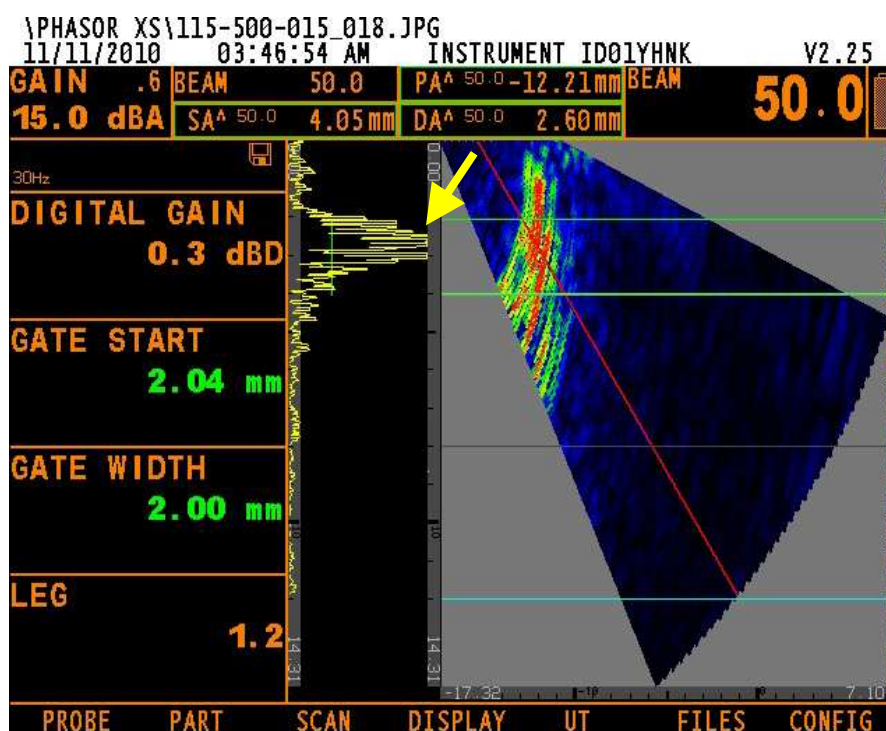
ภาพที่ 4.36 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + FSW + T6 (1,750/160)

(8) ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบหารอยบกพร่อง ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่ As cast + T6 + FSW + T6 เมื่อนำชิ้นงานไปเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อม ปรากฏว่าพบบริเวณที่มีความบกพร่องเป็นลักษณะแนวเส้นสีดำต่อเนื่องกันตรงกลางแนวเชื่อม มีระยะทางยาวประมาณ 20 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4.37 จากนั้นได้นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟส พบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นทั้งลักษณะเส้นยาวต่อเนื่องกัน (สีส้มและสีแดง) และเป็นจุดเล็กๆ

กระจายทั่วทั้งบริเวณแนวเชื่อม (สีเหลืองและสีแดง) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) ที่กระจัดกระจายไม่สม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 4.38 พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 2.60 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง แสดงดังภาพที่ 4.39 จากภาพจะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแตกแยกขนาดใหญ่ตลอดแนวเชื่อมและมีการแตกเล็กๆตรงด้านล่างแนวเชื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Heat Treatment)



ภาพที่ 4.37 फिल्मเอ็กซ์เรย์แนวเชื่อมของที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,750/160)



ภาพที่ 4.38 รอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,750/160)





ภาพที่ 4.39 รอยบกพร่องด้วยการตัดแนวเชื่อมที่ As cast + T6 + FSW + T6 (1,750/160)

จากการตรวจหารอยบกพร่องด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสเทียบกับการเอ็กซ์เรย์ ปรากฏว่าเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสสามารถตรวจค้นหาได้ดี มีประสิทธิภาพและแม่นยำกว่าเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดังแสดงชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วหมุนหัว핀 1,320 รอบต่อนาทีและความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที สภาวะทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) เห็นว่าจากฟิล์มเอ็กซ์เรย์ไม่พบรอยบกพร่องใดๆ เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสพบรอยบกพร่องในแนวเชื่อมเป็นลักษณะเส้นยาวต่อเนื่องกัน (สีเขียวและสีเหลือง) และมีสัญญาณตอบกลับ (Peak) สูงที่สุด เมื่ออ่านข้อมูลจากเครื่องพบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 0.68 มิลลิเมตร และได้ทำการตัด (Section) แนวเชื่อมตรงบริเวณที่พบรอยบกพร่อง จะเห็นว่ารอยบกพร่องมีลักษณะเป็นแนวแยกเล็กๆ และบางมาก อยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม และยังมีอีก 2 แนวเชื่อมคือ As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6 ที่ความเร็วหมุนหัว핀 1,320 รอบต่อนาทีและความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ความเร็วหมุนหัว핀 1,320 รอบต่อนาทีและความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที ดังนั้นสามารถเชื่อได้ว่าการตรวจสอบแบบอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีความแม่นยำและความละเอียดที่ดีกว่าการเอ็กซ์เรย์

เมื่อเปรียบเทียบการตรวจสอบแบบอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสกับการเอ็กซ์เรย์พบว่า การตรวจสอบแบบอัลตราโซนิกมีความสะดวกกว่าการเอ็กซ์เรย์ในการตรวจสอบ เพราะอุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดไม่ใหญ่มาก สามารถพกพาได้สะดวก ส่วนการเอ็กซ์เรย์เป็นเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่ ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บมาก และอันตรายจากรังสีที่ใช้ก็ส่งผลกระทบต่อร่างกายโดยตรง นอกจากนี้การตรวจสอบแบบอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีราคาถูกกว่าการเอ็กซ์เรย์เมื่อเทียบกับการใช้งานแต่ละครั้ง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการใช้งานก็ขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้ใช้และความสามารถของเครื่องที่ใช้ตรวจสอบด้วย

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเรื่องการตรวจหารอยบกพร่องในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อทิ้งของแข็งโดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6 ผลการศึกษาทดลองสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

(1) ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อมความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน มีลักษณะเรียบและสะอาด ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมสูงและที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) มีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากป่าของ Tool นอกจากนี้บริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม จะเกิดการพองบริเวณผิวแนวอันเนื่องมาจากการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงและเป็นเวลานาน ทำให้รูพรุนที่มีอากาศอยู่ใต้ผิวงานเกิดการดันตัวและพองออกมานอกผิวงาน

(2) โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน พบว่าบริเวณที่รอยเชื่อมถูกกวนของสภาวะ As cast + FSW และ As cast + T6 + FSW ไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น ในขณะที่เดียวกันที่รอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม จะปรากฏรอยแตก (Crack) บริเวณรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน

(3) โครงสร้างทางจุลภาคของของรอยเชื่อมความเร็วเชื่อมและสภาวะทางความร้อนที่ต่างกัน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคสภาวะทางความร้อน T6 ก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณเนื้อโลหะเดิม เกรนของเฟส  $\alpha$ -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Si ลักษณะละเอียดกระจัดกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบรอบเฟส  $\alpha$ -Al มีการแพร่ของซิลิกอนออกจากเฟสยูเทคติกซิลิกอนและละลายเข้าสู่อะลูมิเนียมเมตริกซ์ โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุทำให้เกิดการแตกละเอียด

ของโครงสร้างเกรนแบบก่อนกลมและเฟส Eutectic ส่วนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6 และ As cast + T6 + FSW + T6) จะเกิดรอยแตกร้าว (Crack) เป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน ซึ่งการแตกของแนวเชื่อมเกิดขึ้นในระหว่างการชุบน้ำหลังจากกระบวนการอบละลาย

(4) ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 228.92 MPa ที่ความเร็วหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min สภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) แต่ในสภาวะที่ความเร็วหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min สภาวะทางความร้อนหลังการเชื่อม (As cast + FSW + T6) มีค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดของการทดลอง คือ 107.59 MPa

(5) ผลการทดสอบข้อมูลทางสถิติพบว่า ข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม มีการกระจายตัวแบบปกติ ความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 8 ครั้ง ไม่มีความแตกต่างกัน Main Effect ความเร็วรอบ และสภาวะทางความร้อนในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อผลการทดลอง และอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกัน มีอิทธิพลต่อผลการทดลองเช่นกัน ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Fisher ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 และ 1,750 rpm แตกต่างกันทุกสภาวะทางความร้อน ยกเว้นคู่ที่  $1,750_{AW}$  กับ  $1,750_{TW}$  ไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าด้วยวิธี T-test ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 กับ 1,750 rpm ปฏิเสธ  $H_0$  ทุกคู่สภาวะทางความร้อนหรือค่าเฉลี่ยสองค่าความแตกต่าง ยกเว้นที่สภาวะ As cast + T6 + FSW + T6 ยอมรับ  $H_0$  ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

(6) ผลการตรวจสอบหารอยบกพร่องด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสเทียบกับการเอ็กซ์เรย์พบว่า วิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีความถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธีการเอ็กซ์เรย์ เห็นได้จากแนวเชื่อมที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินเชื่อม 160 mm/min และสภาวะกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) พบว่าวิธีการเอ็กซ์เรย์ไม่สามารถตรวจพบรอยบกพร่องได้แต่เมื่อใช้วิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสสามารถตรวจพบรอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 0.68 มิลลิเมตร

จากการทดลองสรุปได้ว่า โครงสร้างทางจุลภาคของสภาวะทางความร้อน T6 ก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณเนื้อ โลหะเดิม เกรนของเฟส  $\alpha$ -Al เป็นลักษณะก่อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Si ลักษณะละเอียดกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบรอบเฟส  $\alpha$ -Al ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นกว่าเนื้อโลหะเดิมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ส่วนโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

ทั่วบริเวณที่ถูกควน ดังนั้นชิ้นงานที่ต้องเชื่อมก่อนแล้วนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) จะต้องเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (1,320 rpm) ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min จึงจะได้ค่าความแข็งแรงดีที่สุด คือ 228.92 MPa และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) ก่อนการเชื่อมจะต้องเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1,750 rpm) จึงจะได้ค่าความแข็งแรงดีที่สุด คือ 172.9 MPa ในส่วนของผลการตรวจสอบหารอยบกพร่องด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสเทียบกับการเอ็กซ์เรย์พบว่า วิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสมีความถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธีการเอ็กซ์เรย์ เห็นได้จากแนวเชื่อมที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (As cast + T6 + FSW) พบว่าวิธีการเอ็กซ์เรย์ไม่สามารถตรวจพบรอยบกพร่องได้แต่เมื่อใช้วิธีอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสสามารถพบรอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 0.68 มิลลิเมตร อีกทั้งการตรวจสอบแบบอัลตราโซนิกมีความสะดวกกว่าการเอ็กซ์เรย์ในการตรวจสอบ เพราะอุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดไม่ใหญ่มาก สามารถพกพาได้สะดวก ส่วนการเอ็กซ์เรย์เป็นเครื่องที่มีขนาดใหญ่ ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บมาก และอันตรายจากรังสีที่ใช้ก็ส่งผลกระทบต่อร่างกายโดยตรง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการใช้งานก็ขึ้นอยู่กับ ความสามารถของผู้ใช้ ความสามารถของเครื่องที่ใช้ตรวจสอบด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) ก่อนการเชื่อมควรตรวจสอบผิวของแผ่นงานเชื่อมก่อนทำการเชื่อมเพื่อป้องกันคราบสกปรกต่างๆ ติดกับผิว เพราะคราบสกปรกต่างๆ อาจจะทำให้เกิดความบกพร่องในรอยเชื่อมได้
- (2) ก่อนทำการเชื่อมควรเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อที่จะให้ความร้อนเกิดการสะสมในแผ่นรองชิ้นงานก่อน อีกทั้งเพื่อไล่ความชื้นในแผ่นรองชิ้นงานด้วย
- (3) การยึดจับชิ้นงานเชื่อมบนจิ๊ก ควรขันสกรูให้แน่น เพราะขณะทำการเชื่อมจะมีแรงกดและการสั่นสะเทือนขึ้น หากสกรูไม่แน่นพออาจจะทำให้ชิ้นงานมีการเคลื่อนได้
- (4) การทำกระบวนการทางความร้อนของอะลูมิเนียมมีตั้งแต่ T1-T10 ในงานวิจัยนี้เลือกมาแค่แบบเดียวคือ T6 ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสภาวะทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเพื่อลดการเกิดรอยแตกในแนวเชื่อม
- (5) กระบวนการทางความร้อนมีอุณหภูมิ เวลา และลำดับขั้นตอนที่แตกต่างกัน ดังนั้นควรศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิ เวลา และลำดับขั้นตอนของสภาวะทางความร้อนที่เหมาะสม ต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของเชื่อม ทั้งก่อนและหลังการเชื่อมให้ดีขึ้น

(6) การศึกษาในงานวิจัยนี้ยังมีส่วนของการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมน้อย เช่น ความเร็วหมุนของหัวพินและความเร็วเดินเชื่อม ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลของเชื่อมให้ดีขึ้น

(7) สภาวะทางความร้อนมีขั้นตอนของการชุบ (Quenching) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารจุ่มชุบชนิดเดียวคือ น้ำ ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารจุ่มชุบที่แตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและลดการเกิดรอยแตกในแนวเชื่อม

## บรรณานุกรม

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, อนินท์ มีมนต์ และ ประกอบ บุญยงค์, 2550, “การเชื่อมรอยต่ออะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน”, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5, 10-11 พฤษภาคม 2550.

การตรวจสอบ โดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสี [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

<http://www.tint.or.th/application/apply-rt.html> x-ray (วันที่ค้นข้อมูล 3 กุมภาพันธ์ 2553).

เจษฎา วรรณสินธุ์, 2549, “เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติงแบบกึ่งของแข็ง” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3. สงขลา, ประเทศไทย 1-12.

ประกาศ เมืองจันทร์บุรี, 2550, “การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียม”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รายงานการทดลองภายใน การเชื่อมอะลูมิเนียม SSM A356.

ธงชัย เครือผือ และ ประกาศ เมืองจันทร์บุรี, 2551, “อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2551 20-22 ตุลาคม 2551. สงขลา, ประเทศไทย 933-939.

พยูร เกตุกราย, 2523, การหล่อโลหะ ภาคการผลิต. สมาคมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น) กรุงเทพมหานคร.

แมน อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, 2544, วัสดุวิศวกรรม. McGraw-Hill. กรุงเทพมหานคร.

วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542, “การหลอมละลาย และการปรับปรุงทางโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Al-Si-Cu-Mg alloys LM25”, เทคโนโลยีการหล่อโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กรุงเทพมหานคร.

สิริพร ชันทองคำ “อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อ แบบกึ่งของแข็ง A356”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2552.

อัปดุล บินระหีม, นกิสพร มีมงคล และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี, 2551, “ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยา และทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยี การหล่อกึ่งของแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน”, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2551 20-22 ตุลาคม 2551. สงขลา, ประเทศไทย 1111-1116.

อลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม (Aluminum-Silicon-Magnesium Casting).

[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.aluminiumlearning.com/html/index\\_casting.html](http://www.aluminiumlearning.com/html/index_casting.html) (วันที่ค้นข้อมูล 9 ตุลาคม 2552).

Akhter R., Ivanchev L., and Burger H.P., 2007, “Effect of pre/post T6 heat treatment on the mechanical properties of laser welded SSM cast A356 aluminium alloy”, Materials Science and Metallurgical Engineering University of Pretoria South Africa: pp.192-197.

Alan P.D., Thomas E.P., Adam E.K. and Thomas A.C., 2001, “Mechanical Properties of High Performance Aluminum Castings”, Automotive Casting Processes and Materials SAE 2001 World Congress Detroit, Michigan March 5-8 2001.

An Introduction to Ultrasonic Phased Array Technology. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonics/intro-to-pa/> (วันที่ค้นข้อมูล 9 ตุลาคม 2552).

Chen Y.C., Liu H.J. and Feng J.C., 2005, “Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2219-0 friction stir welding joints”, Material Science and Engineering 40: pp. 4657-4659.

Ciorau P., n.d., “A Contribution to Phased Array Ultrasonic Inspection of Welds Part 1: Data Plotting for S- and B-Scan Displays”, Ontario Power Generation Inc. Inspection and Maintenance Services Pickering Ontario Canada.

Elangovan K. and Balasubramanian V., 2007, “Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”, Materials Processing Technology 200: pp. 163–175.

Elangovan K. and Balasubramanian V., 2008, “Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints”, Materials Characterization 59: pp. 1168–1177.

- Flemings M.C., 1974, "Solidification processing", McGraw-Hill, Inc: pp. 146-154.
- Flemings M.C. and Johnson W.L., 2002, "High viscosity liquid and semi-solid metal casting:Processes and products", Plenary lecture world foundry conference 2002, KyongJu. Korea, October 20-24.
- Johnston P.H., n.d., "Addressing the Limit of Detectability of Residual Oxide Discontinuities in Friction Stir Butt Welds of Aluminum Using Phased Array Ultrasound", Nasa Langley Research Center. VA 23681.
- Kang C.G., Bae J.W. and Kim B.M., 2007, "The grain size control of A356 aluminum alloy by horizontal electromagnetic stirring for rheology forging", *Materials Processing Technology* 2007: pp. 187-188.
- Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T. and Nakata K., 2005, "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy", *Material Science and Engineering A* 415: pp. 250-254.
- Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T. and Nakata K., 2006, "Effect of Welding parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy", *Material Science and Engineering A* 415: pp. 250-254.
- Lambard H., Hattingh D.G., Steuwer A. and James M.N., et al., 2007, "Optimising FSW process parameters to minimize defects and maximize fatiguelife in 5083-h321 aluminium alloy", *Engineering Fracture Mechanics*: pp. 1-14.
- Lamarre A. and Moles M., 2000, "Ultrasound Phased Array Inspection Technology for the Evaluation of Friction Stir Welds", R/D Tech
- Lee W.B., Yeon Y.N. and Jung S.B., 2003, "The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy", *Material Science and Engineering A356*: pp. 154-159.
- Lonsdale C., Traxler J., Wagner R. and Meyer P., n.d., "Phased Array Ultrasonic Inspection of New Wrought Railroad Wheel Rims", Technical Manager-Railway Products Burnham, pa, usa.
- Lumley R.N., Odonnell R.G., Gunasegaram D.R. and Givord M., 2007, "Heat Treatment of High-Pressure Die Castings", *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* 2007. Volume 38A: pp.2564-2574.



- Martinez R.A., 2004, Ph.D.Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma, USA
- Ma Z.Y., Sharma S.R. and Mishra R.S., 2006, "Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum", *Material Science and Engineering A* 433: pp. 269-278.
- Meyers C.W., 1985, "Solution Heat Treatment Effects on Ultimate Tensile Strength and Uniform Elongation in A357 Aluminum Alloys", *AFS Trans.*, Vol. 93: pp.511-518.
- Mishra R.S. and Ma Z.Y., 2005, "Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering* 50: pp. 1-78.
- Moller H., Govender G. and Stumpf W.E., n.d., "The T6 heat treatment of Semi-solid Metal Processed Alloy A356", *Materials Science and Metallurgical Engineering University of Pretoria South Africa*.
- Montgomery D.C., 2005, "Design and Analysis of Experiments", Sixth edition. USA: Hamilton Printing.
- Munich., 2006, "Downforce of friction stir", pp. 223.
- Nafisi S. and Gomashchi R., 2006, "Combined grain refining and medication of conventional and rheocast A356 Al - Si alloy", *Materials Characterization* 57: pp. 377 – 378.
- Rajiv S.M. and Murray W.M., editors "Friction Stir Welding and Processing" pp. 1.
- Santella M.L., Engstrom T., Storjohann D. and Pan T.-Y., 2005, "Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356", *Scripta Material* 53: pp. 201-206.
- Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple smith P. and Dawes C.J., 1991, "Friction Stir Butt Welding", International Patent application, No. PCT/GB92/02203 and GB patent application, No.9125978.8.
- Thomas W.M. and Nicholas E.D., 1997, "Friction Stir Welding for the Transportation Industries", *Materials and Design* 18: pp. 269-273.
- Zah M.F. and Eireiner B., 2004, "Friction stir of parameters", No. 4: pp. 223.
- Zhao Y.H., Lin S.B., Lin W. and Qu F.X., 2005, "The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy", *Materials Letters* 59: pp. 2948 – 2952.

ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก

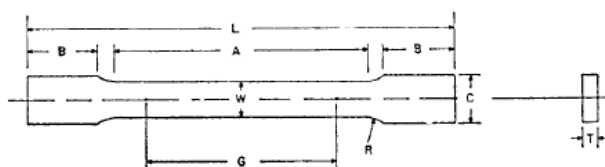
ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติทางโลหวิทยาและสมบัติทางกล

### ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายเจือจาง Keller's reagent

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| กรดไฮโดรฟลูออริก | ความเข้มข้น 48% 2 ml |
| กรดไฮโดรคลอริก   | (เข้มข้น) 3 ml       |
| กรดไนตริก        | 5 ml                 |
| น้ำ              | 190 ml               |

### ก.2 ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8

ASTM E 8



|  | Dimensions              |                        |                  |
|--|-------------------------|------------------------|------------------|
|  | Standard Specimens      |                        | Subsize Specimen |
|  | Plate-Type, 1½-in. Wide | Sheet-Type, ½-in. Wide | ¼-in. Wide       |
|  | in.                     | in.                    | in.              |
| G—Gage length (Note 1 and Note 2)                        | 8.00 ± 0.01             | 2.000 ± 0.005          | 1.000 ± 0.003    |
| W—Width (Note 3 and Note 4)                              | 1½ + ⅛, - ¼             | 0.500 ± 0.010          | 0.250 ± 0.005    |
| T—Thickness (Note 5)                                     |                         | thickness of material  |                  |
| R—Radius of fillet, min (Note 6)                         | 1                       | ½                      | ¼                |
| L—Over-all length, min (Note 2 and Note 7)               | 18                      | 8                      | 4                |
| A—Length of reduced section, min                         | 9                       | 2¼                     | 1¼               |
| B—Length of grip section, min (Note 8)                   | 3                       | 2                      | 1¼               |
| C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9) | 2                       | ¾                      | ¾                |

NOTE 1—For the 1½-in. wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 1 in. apart, or one or more pairs of punch marks 8 in. apart may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 1½-in. wide specimens are not required, a minimum length of reduced section ( $A$ ) of 2¼ in. may be used with all other dimensions similar to those of the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004, 0.002 or 0.001 in., respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 0.015, 0.005, or 0.003 in., respectively, larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths ( $W$  and  $C$ ) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension  $T$  is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 1½-in. wide specimens shall be ⅜ in. Maximum thickness of ½-in. and ¼-in. wide specimens shall be ¾ in. and ¼ in., respectively.

NOTE 6—For the 1½-in. wide specimen, a ½-in. minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 100 000 psi in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—To aid in obtaining axial force application during testing of ¼-in. wide specimens, the over-all length should be as large as the material will permit, up to 8.00 in.

NOTE 8—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of ½-in. wide specimens is over ¾ in., longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 0.10, 0.05 and 0.005 in., respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the ½-in. wide specimen shall be symmetrical within 0.01 in.

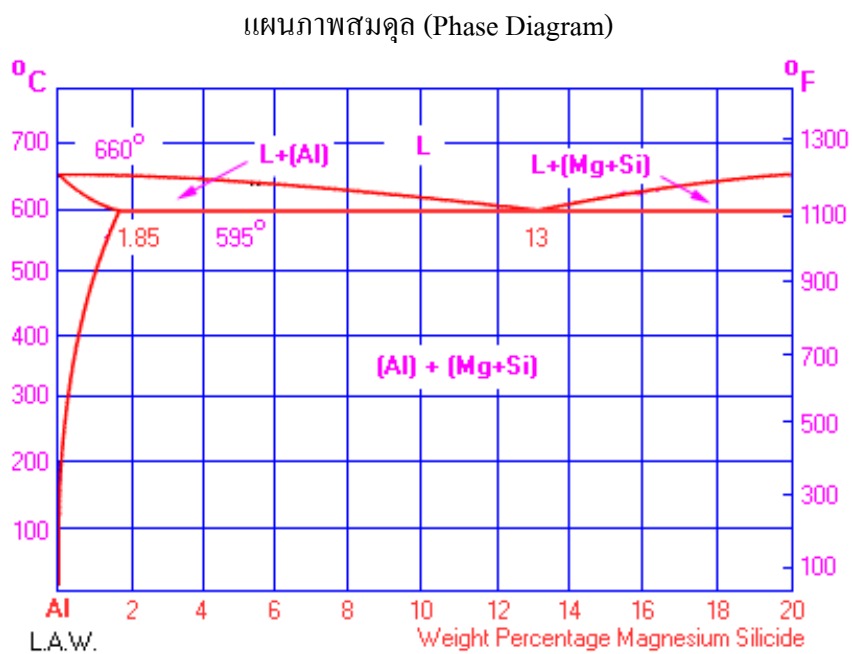
NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 0.05 in., and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 0.10 in.

NOTE 11—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than  $2W$  from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

## ภาคผนวก ข

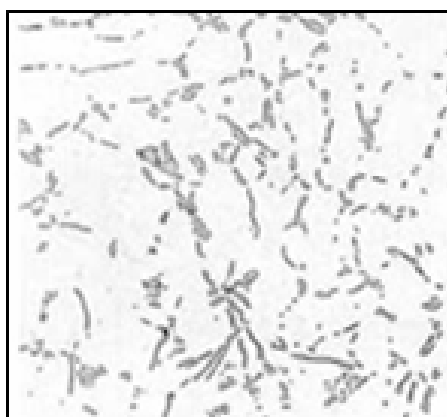
แผนภาพสมดุลเฟสและภาพโครงสร้างทางจุลภาค

ข.1 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียม - ซิลิกอน - แมกนีเซียมหล่อผสม



ภาพที่ ข.1 แผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิไซด์  
(Aluminum - Magnesium - Silicide Phase Diagram)

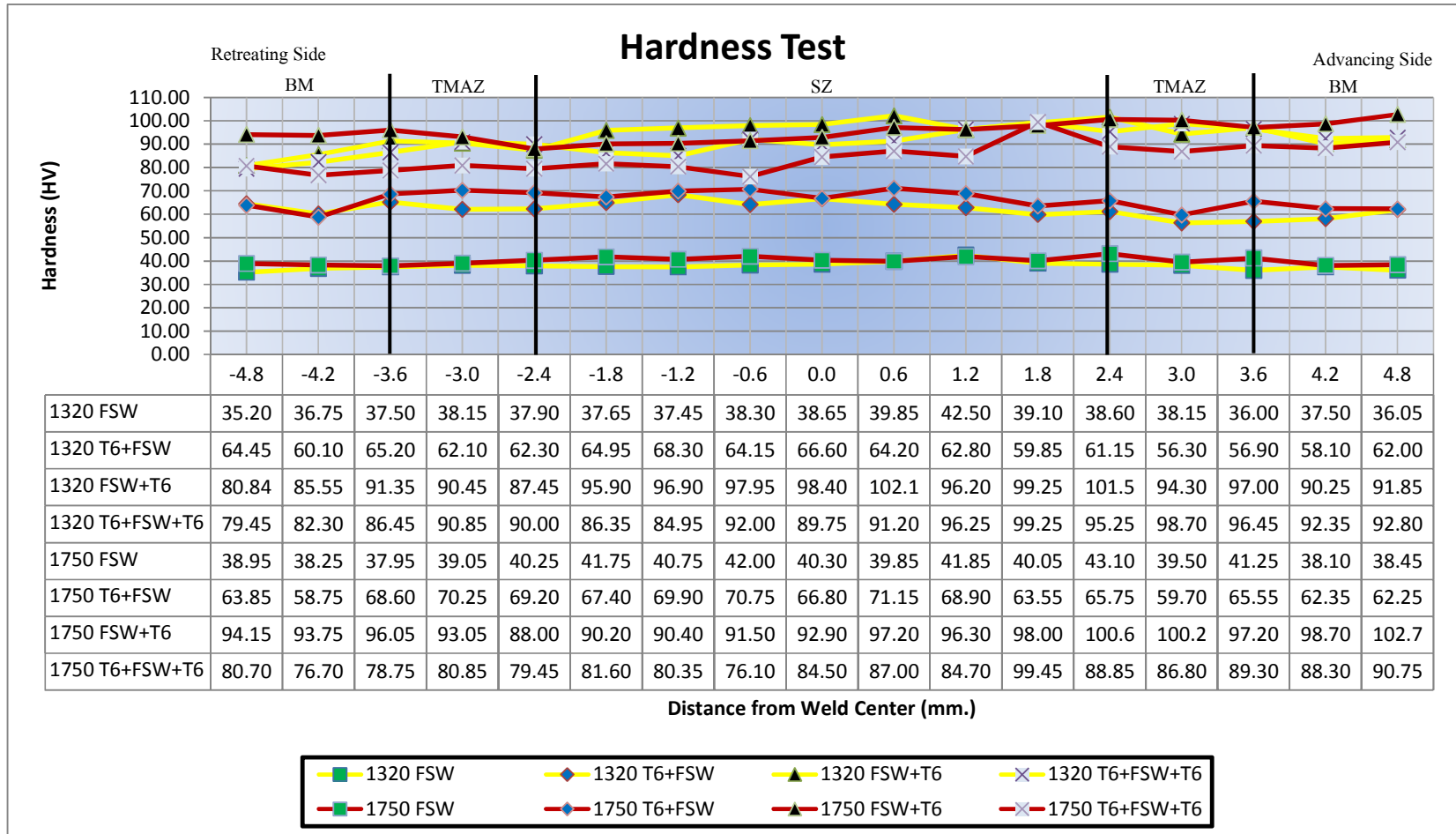
ข.2 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม



ภาพที่ ข.2 โครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356

### ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



ภาพที่ ค.1 กราฟค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



### ภาคผนวก ง

ค่าความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ตารางที่ ง.1 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเนื้อโลหะเดิม

| สภาพ      | ชั้นที่ | Tensile Test (MPa) |       |                | จุดขาด       |
|-----------|---------|--------------------|-------|----------------|--------------|
|           |         | UTS                | YS    | Elongation (%) |              |
| Base      | 1       | 171.2              | 137.0 | 4.8            | Gauge Length |
|           | 2       | 165.4              | 132.3 | 5.6            | Gauge Length |
|           | 3       | 167.6              | 134.1 | 4.4            | Gauge Length |
|           | 4       | 170.7              | 136.6 | 6.2            | Center       |
| Base + T6 | 1       | 300.2              | 240.2 | 5.2            | Gauge Length |
|           | 2       | 294.9              | 235.9 | 4.6            | Gauge Length |
|           | 3       | 293.4              | 234.7 | 4.8            | Center       |
|           | 4       | 293.8              | 235.0 | 4.4            | Center       |

ตารางที่ ง.2 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบของพิน 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตร/นาที ในทุกสภาวะทางความร้อน

| ความเร็ว  | สภาวะ | ชั้นที่ | Tensile Test (MPa) |       |                | จุดขาด |
|-----------|-------|---------|--------------------|-------|----------------|--------|
|           |       |         | UTS                | YS    | Elongation (%) |        |
| 1,320/160 | AW    | 1       | 165.4              | 132.3 | 3.5            | Base   |
|           |       | 2       | 167.8              | 134.2 | 3.3            | Weld   |
|           |       | 3       | 166.8              | 133.4 | 3.1            | Base   |
|           |       | 4       | 166.6              | 133.3 | 3.4            | Weld   |
|           | TW    | 1       | 119.4              | 95.5  | 2.8            | Weld   |
|           |       | 2       | 118.4              | 94.7  | 3.1            | Weld   |
|           |       | 3       | 117.2              | 93.8  | 3.0            | Weld   |
|           |       | 4       | 118.8              | 95.0  | 3.2            | Weld   |
|           | WT    | 1       | 228.3              | 182.6 | 2.8            | Weld   |
|           |       | 2       | 227.8              | 182.2 | 2.5            | Weld   |
|           |       | 3       | 229.5              | 183.6 | 2.6            | Weld   |
|           |       | 4       | 229.9              | 183.9 | 2.4            | Weld   |
|           | TWT   | 1       | 137.6              | 110.1 | 3.1            | Weld   |
|           |       | 2       | 137.2              | 109.8 | 3.6            | Weld   |
|           |       | 3       | 135.5              | 108.4 | 3.2            | Weld   |
|           |       | 4       | 136.8              | 109.4 | 3.4            | Weld   |
|           |       | 4       | 150.2              | 120.2 | 3.9            | Base   |

AW: As cast + FSW, TW: As cast + T6 + FSW, WT: As cast + FSW +T6 และ TWT: As cast + T6 + FSW + T6

ตารางที่ 3.3 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบของพิน 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตร/นาที ในทุกสภาวะทางความร้อน

| ความเร็ว  | สภาวะ | ชั้นที่ | Tensile Test (MPa) |       |                | จุดขาด |
|-----------|-------|---------|--------------------|-------|----------------|--------|
|           |       |         | UTS                | YS    | Elongation (%) |        |
| 1,750/160 | AW    | 1       | 174.4              | 139.5 | 3.4            | Base   |
|           |       | 2       | 173.5              | 138.8 | 3.1            | Weld   |
|           |       | 3       | 173.7              | 139.0 | 2.7            | Weld   |
|           |       | 4       | 172.4              | 137.9 | 3.2            | Weld   |
|           | TW    | 1       | 173.5              | 138.8 | 4.1            | Weld   |
|           |       | 2       | 172.6              | 138.1 | 5.1            | Weld   |
|           |       | 3       | 173.2              | 138.6 | 4.3            | Weld   |
|           |       | 4       | 172.1              | 137.7 | 4.4            | Weld   |
|           | WT    | 1       | 106.2              | 85.0  | 0.9            | Weld   |
|           |       | 2       | 108.5              | 86.8  | 1.5            | Weld   |
|           |       | 3       | 107.9              | 86.3  | 1.3            | Weld   |
|           |       | 4       | 107.7              | 86.2  | 1.4            | Weld   |
|           | TWT   | 1       | 144.2              | 115.4 | 1.8            | Weld   |
|           |       | 2       | 143.3              | 114.6 | 1.6            | Weld   |
|           |       | 3       | 143.8              | 115.0 | 1.5            | Weld   |
|           |       | 4       | 142.3              | 113.8 | 1.2            | Weld   |
|           |       | 4       | 151.6              | 121.3 | 2.9            | Base   |

AW: As cast + FSW, TW: As cast + T6 + FSW, WT: As cast + FSW +T6 และ TWT: As cast + T6 + FSW + T6

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายวรพงศ์ บุญช่วยแทน

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120035

## วุฒิการศึกษา

| วุฒิ  | ชื่อสถาบัน                          | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|---|-------------------------------------|---------------------|
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต<br>(วิศวกรรมอุตสาหกรรม) | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย | 2552                |

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ 2552
- ทุนจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ 2552

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วรพงศ์ บุญช่วยแทน ธเนศ รัตนวิไล และประภาศ เมืองจันทร์บุรี “อิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อนและหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็ง SSM 356” การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (IE Network 2010) ระหว่างวันที่ 13-15 ตุลาคม 2553 ณ โรงแรมสุนีย์แกรนด์แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จ.อุบลราชธานี