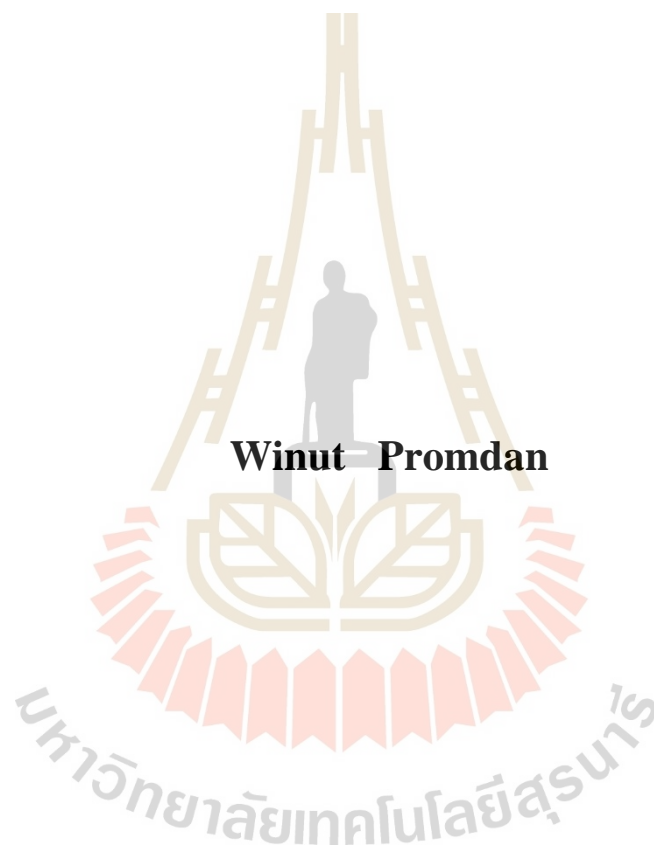


ผลกระทบของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็ก
ต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**INFLUENCE OF SMALL FRICTION STIR MACHINE
ON ALUMINIUM ALLOY WELDING**



Winut Promdan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2020**

ผลกระทบของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็ก
ต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.วรรณัช นุ่งสุต)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชูช่างูร)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิศวกรรมศาสตร์

วิรัช พรหมแดน : ผลกระทบของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็กต่อการเชื่อม
อะลูมิเนียมผสม (INFLUENCE OF SMALL FRICTION STIR MACHINE ON ALUMINIUM
ALLOY WELDING) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์, 105 หน้า

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ปัจจุบันนิยมใช้เชื่อมต่อวัสดุที่ยากต่อการเชื่อม
แบบหลอมละลาย โดยคัดแปลงเครื่องกัดแบบแนวตั้งใช้กับเครื่องมือกวนลักษณะต่าง ๆ จาก
การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าแรงกระทำตามแนวแกน และแรงกดจากเครื่องมือกวนมีค่าสูง
ส่งผลต่อ อายุการใช้งาน และเกิดความเสียหายต่อเครื่องกัดได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพ
ของรอยเชื่อมจากเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็กที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง
โดยมีความกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร สปินเดิลของเครื่องเชื่อม
ให้แรงบิด 15 Nm. ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่แนวแกน X 100 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ระบบ
ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ การทดลองใช้อะลูมิเนียม 2024 และ 5083 โดยศึกษาตัวแปรความเร็วรอบ
หมุนของเครื่องมือกวน ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน มุมเอียงของเครื่องมือกวน และความเร็วในการ
เดินเชื่อม ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมขนาดเล็ก พบว่าในการเชื่อมอะลูมิเนียม
2024 ตัวแปรความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือ 1,000 รอบต่อนาที ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน
15 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 318.61 MPa
และการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ตัวแปรความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือ 1,800 รอบต่อนาที ความเร็ว
ในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 224.41 MPa ประสิทธิภาพ
ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 และอะลูมิเนียม 5083 ให้ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมมากกว่า
68 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุเดิม ชุดสปินเดิลของเครื่องเชื่อมใช้พลังงานไฟฟ้า 95 เปอร์เซ็นต์ของการใช้
พลังงานทั้งหมด เครื่องเชื่อมต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา วิรัช พรหมแดน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์

WINUT PROMDAN : INFLUENCE OF SMALL FRICTION STIR MACHINE
ON ALUMINIUM ALLOY WELDING. THESIS ADVISOR :
SOMSAK SIWADAMROMGPONG, Ph.D., 105 PP.

FRICTION STIR MACHINE /ALUMINIUM ALLOY/ STIR TOOL /MECHANICAL PROPERTIES

The friction stir welding process was developed for material which is difficult to weld with fusion techniques. The existing process was usually applied vertical milling machine with stirring tool. Various literature reviews were reported that friction stir welding may affect breakdown rate or runout of the machine from high axial force during welding. Therefore, objective of this research was to focus on weldment performance from in-house developed small friction stir machine. The semi-automatic small machine was 50 cm width, 60 cm length, and 80 cm height. Spindle of the machine could generate torque 15 Nm with maximum travel speed on X-axis 100 mm/min. The weldment performance was tested by welding of Al2024 and Al5083. 4 parameters including rotational speed, shoulder diameter, tilt angle and feed rate were studied. On welding of Al2024, it was found that maximum tensile strength of 318.61 MPa was found with rotational speed 1,000 rpm., shoulder diameter 15 mm., and tilt angle 3 degrees. On the other hand, maximum tensile strength of Al5083 specimen was reached at 224.41 MPa with rotational speed 1,800 rpm., and welding speed 30 mm/min. It was concluded that acceptable weldment performance was achieved with strength higher than 68% of based material and power consumption of the machine was

belonged to spindle driving with 95 percent of overall power consumption.



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature

วิฑิต อรรถาโณน

Advisor's Signature

~~~~~

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้รับความเมตตา จากบุคลากรต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้โอกาสทางการศึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิชาการ ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากงานวิจัย คอยให้กำลังใจ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุดตาชาติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณ วนษ์ บุ่งสุด อาจารย์ ดร.จิตติมา วรกุล อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณคมสัน ภาษยเดช คุณวิเชษฐ์ เผือกแดง คุณนพพร แถวเพชร คุณวาที ทิพย์เลิศ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาจนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ที่ช่วยเหลือด้านงานเอกสารต่างๆ ในระหว่างที่เข้าศึกษาจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อสุนัน พรหมแดน และคุณแม่สุวรรณ พรหมกล้า ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา ให้กำลังใจในระหว่างศึกษา จนสามาถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และสำเร็จการศึกษาได้ในวันนี้

วินท์ พรหมแดน



# สารบัญ

หน้า

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....                         | ก  |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....                      | ข  |
| กิตติกรรมประกาศ.....                            | ง  |
| สารบัญ.....                                     | จ  |
| สารบัญตาราง.....                                | ฉ  |
| สารบัญรูป.....                                  | ญ  |
| <b>บทที่</b>                                    |    |
| <b>1 บทนำ</b>                                   |    |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....              | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....                   | 3  |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย.....                         | 3  |
| 1.4 วิธีการวิจัย.....                           | 3  |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....              | 4  |
| <b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>          |    |
| 2.1 การเชื่อมโลหะ (Metal Welding).....          | 5  |
| 2.2 กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน.....   | 6  |
| 2.2.1 ตัวแปรในกระบวนการเชื่อมแบบเสียดทาน.....   | 7  |
| 2.3 อลูมิเนียม.....                             | 8  |
| 2.4 เครื่องจักรกล.....                          | 11 |
| 2.4.1 การออกแบบเพลลา.....                       | 11 |
| 2.4.1 ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอัตโนมัติ.....       | 14 |
| 2.5 การทดสอบวัสดุ.....                          | 16 |
| 2.5.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)..... | 16 |
| 2.6 กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า.....  | 18 |



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |                                                                                             |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7      | การออกแบบการทดลอง .....                                                                     | 19 |
| 2.8      | สิทธิ์บัตรงานวิจัย.....                                                                     | 21 |
| 2.9      | บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                                            | 23 |
| <b>3</b> | <b>วิธีการวิจัย</b>                                                                         |    |
| 3.1      | การออกแบบเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....                                                   | 32 |
| 3.1.1    | อภิปรายปัญหาของกระบวนการ เชื่อมเสียดทานแบบกวน.....                                          | 32 |
| 3.1.2    | การออกแบบต้นแบบสำหรับการเชื่อมแบบเสียดทาน .....                                             | 33 |
| 3.1.3    | ลักษณะเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                                     | 37 |
| 3.1.4    | ระบบการทำงานของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                            | 39 |
| 3.1.5    | ขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร.....                                                          | 41 |
| 3.2      | ดำเนินการสร้างต้นแบบสำหรับเครื่องเชื่อมแบบเสียดทาน.....                                     | 41 |
| 3.3      | การทดสอบประสิทธิภาพ .....                                                                   | 42 |
| 3.3.1    | ออกแบบการทดลอง.....                                                                         | 42 |
| 3.3.2    | ดำเนินการทดลอง.....                                                                         | 44 |
| 3.3.3    | ทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ .....                                                              | 47 |
| <b>4</b> | <b>ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>                                                     |    |
| 4.1      | ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร .....                                                     | 49 |
| 4.2      | ลักษณะกายภาพของผิวรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....                                              | 51 |
| 4.3      | กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียด<br>ทานแบบกวน .....              | 54 |
| 4.3.1    | กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า ของมอเตอร์สปินเดล<br>ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 2024..... | 54 |
| 4.3.2.   | กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์<br>สปินเดลในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083.....  | 63 |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|       |                                                                                  |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4   | อุณหภูมิกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                      | 69 |
| 4.4.1 | อุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024.....                                   | 69 |
| 4.4.2 | อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน<br>อะลูมิเนียม 2024.....     | 70 |
| 4.4.3 | อุณหภูมิในกระบวนการเชื่อม อะลูมิเนียมผสม 5083 .....                              | 71 |
| 4.4.4 | อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน<br>อะลูมิเนียมผสม 5083 ..... | 72 |
| 4.5   | สมบัติทางกลของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....                                       | 73 |
| 4.5.1 | ค่าความต้านทานแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 2024 .....                        | 73 |
| 4.5.2 | ค่าความต้านทานแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 .....                        | 76 |
| 4.5.3 | โครงสร้างมหภาคงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม<br>2024.....                  | 78 |
| 4.5.4 | ค่าความแข็งของแนวเชื่อม ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024.....                         | 80 |
| 4.5.5 | ค่าความแข็งของแนวเชื่อม ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083.....                         | 81 |
| 4.6   | วิเคราะห์ผลทางสถิติ .....                                                        | 82 |
| 4.6.1 | วิเคราะห์ความแปรปรวนในการเชื่อม อะลูมิเนียมผสม 2024 .....                        | 82 |
| 4.6.2 | สมการพหุคูณ .....                                                                | 86 |
| 4.6.3 | วิเคราะห์ความแปรปรวนในการเชื่อม อะลูมิเนียมผสม 5083 .....                        | 87 |
| 5     | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ                                                      |    |
| 5.1   | สรุปผลการวิจัย.....                                                              | 93 |
| 5.1.1 | เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                                | 93 |
| 5.1.2 | กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า.....                                       | 93 |
| 5.1.3 | สมบัติทางกลของแนวเชื่อม.....                                                     | 94 |
| 5.2   | ข้อเสนอแนะ .....                                                                 | 94 |
| 5.3   | การประยุกต์ในอนาคต.....                                                          | 95 |
|       | รายการอ้างอิง .....                                                              | 96 |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาคผนวก ก.บทความทางวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา ..... | 99  |
| ประวัติผู้เขียน .....                                                 | 105 |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                               | หน้า |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1      | แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป .....                                | 9    |
| 2.2      | ค่าตัวประกอบความล้า .....                                                     | 13   |
| 2.2      | แสดงค่าความปลอดภัย .....                                                      | 14   |
| 2.4      | ลิตธิบัติรงานวิจัย .....                                                      | 21   |
| 3.1      | รายงานผลการวิจัย ต่อแรงบิดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                     | 32   |
| 3.2      | ตัวแปรในการออกแบบเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                            | 37   |
| 3.3      | ชิ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องจักร .....                                          | 40   |
| 3.4      | ต้นทุนในการสร้างเครื่องจักรต้นแบบ .....                                       | 41   |
| 3.5      | ตัวแปรในการทดลอง อะลูมิเนียมผสม 2024 .....                                    | 42   |
| 3.6      | ตัวแปรในการทดลอง อะลูมิเนียมผสม 5083 .....                                    | 43   |
| 3.7      | ส่วนผสมทางเคมีของ อะลูมิเนียมผสม 2024 .....                                   | 43   |
| 3.8      | ส่วนผสมทางเคมีของ อะลูมิเนียมผสม 5083 .....                                   | 43   |
| 3.9      | วัสดุและเครื่องมือในการทดลอง .....                                            | 44   |
| 4.1      | องค์ประกอบหลักของเครื่องจักร .....                                            | 50   |
| 4.2      | ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน มุมเอียงเครื่องมือกวน 1 องศา .....              | 51   |
| 4.3      | ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน มุมเอียงเครื่องมือกวน 3 องศา .....              | 51   |
| 4.4      | ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 .....            | 53   |
| 4.5      | พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 2024 .....               | 59   |
| 4.6      | พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 .....                  | 66   |
| 4.7      | อุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสม 2024 .....             | 69   |
| 4.8      | วิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม<br>2024 ..... | 83   |
| 4.9      | ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ .....                                              | 84   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า                                                                                 |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.10     | ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ค่าความแข็งแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม<br>2024 .....86 |
| 4.11     | ค่าสัมประสิทธิ์การตัดลื่นใจ การพยากรณ์ค่าความแข็งแรงดึง.....86                       |
| 4.12     | วิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 .....89         |
| 4.13     | ค่าสัมประสิทธิ์การตัดลื่นใจ .....89                                                  |



## สารบัญรูป

| รูปที่ |                                                                                                      | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1    | การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน .....                                                                 | 6    |
| 2.2    | เครื่องมือกวน สำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                              | 7    |
| 2.3    | แรงบิดที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                   | 8    |
| 2.4    | อะลูมิเนียม .....                                                                                    | 9    |
| 2.5    | เพลายู่ภายใต้แรงต่าง ๆ .....                                                                         | 11   |
| 2.6    | เซอร์โวมอเตอร์ .....                                                                                 | 15   |
| 2.7    | บอลสกรู .....                                                                                        | 16   |
| 2.8    | เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด .....                                             | 16   |
| 2.9    | ทริทเมนต์คอมพิเนชันของแผนการทดลองแบบ $2^2$ แฟกทอเรียล .....                                          | 21   |
| 3.1    | ขั้นตอนการวิจัย.....                                                                                 | 31   |
| 3.2    | แรงบิดที่เกิดขึ้นจากขนาดปากเครื่องมือกวน และแรงกระทำในแนวแกน X<br>กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน..... | 33   |
| 3.3    | ชุดสปินเดิลของเครื่องจักร .....                                                                      | 32   |
| 3.4    | ขนาดและรูปร่างเพลาส่งกำลังชุดสปินเดิล .....                                                          | 34   |
| 3.5    | แรงบิดในเพลาส่งกำลังชุดสปินเดิล .....                                                                | 35   |
| 3.6    | แบบเครื่องเชื่อมเสียดทาน .....                                                                       | 38   |
| 3.7    | ระบบการควบคุมเครื่องจักร .....                                                                       | 39   |
| 3.8    | ขั้นตอนการควบคุมเครื่องจักร .....                                                                    | 41   |
| 3.9    | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางปากของเครื่องมือกวน และมุมเอียงของเครื่องมือกวน .....                            | 42   |
| 3.10   | เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                                                    | 44   |
| 3.11   | คอมพิวเตอรืสำหรับบันทึกข้อมูลความร้อน และพลังงานไฟฟ้า .....                                          | 45   |
| 3.12   | การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง .....                                                                    | 45   |
| 3.13   | การจับยึดชิ้นงานเชื่อมด้วย จิ๊กและฟิกเจอร์ .....                                                     | 46   |
| 3.14   | เครื่องจักร CNC แบบ 3 แกนสำหรับกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง .....                                    | 46   |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                                                                                                     | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.15   | จิกและฟีกเจอร์สำหรับกักขังรูปชิ้นทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบแรงดึง .....                                                                                               | 47   |
| 3.16   | เครื่องทดสอบแรงดึง.....                                                                                                                                             | 47   |
| 3.17   | เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ .....                                                                                                                          | 48   |
| 3.18   | กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....                                                                                                                                           | 48   |
| 4.1    | ข้อมูล Runout ชุดสปินเดิลของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....                                                                                                       | 51   |
| 4.2    | ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน ก) ขนาดบ่าเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร<br>ข) ขนาดบ่าเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร .....                                                     | 53   |
| 4.3    | ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083 .....                                                                                                               | 54   |
| 4.4    | แนวโน้มกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิลในกระบวนการเชื่อม โดยใช้<br>เครื่องมือกวนขนาดบ่า 15 มิลลิเมตร.....                                                               | 55   |
| 4.5    | แนวโน้มการเกิดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิลในกระบวนการเชื่อม<br>โดยใช้เครื่องมือกวนขนาดบ่า 9 มิลลิเมตร .....                                                         | 56   |
| 4.6    | กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน<br>โดยใช้อะลูมิเนียม 2024 .....                                                                          | 57   |
| 4.7    | แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมของมอเตอร์สปินเดิล<br>และมอเตอร์แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024.....                                                      | 58   |
| 4.8    | การใช้พลังงานไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิล<br>โดยใช้ขนาดบ่าเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024.....                           | 60   |
| 4.9    | การใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิล<br>โดยใช้ขนาดบ่าเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024.....                          | 61   |
| 4.10   | ก) พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิลและชุดแกน X ขนาดบ่าเครื่องมือกวน<br>15 มิลลิเมตร ข) พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิลและชุดแกน X ขนาดบ่าของ<br>เครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร..... | 62   |
| 4.11   | แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิล การเชื่อมเสียดทานแบบกวน<br>ในอะลูมิเนียม 5083 .....                                                                       | 63   |
| 4.12   | กำลังไฟฟ้าสูงสุดในกระบวนการเชื่อม โดยใช้อะลูมิเนียม 5083 .....                                                                                                      | 64   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                                                                                                                                  |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.13   | แนวโน้มกระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มอเตอร์<br>สปินเดิลและมอเตอร์แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083.....65                                                                |
| 4.14   | พลังงานไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิล ในการ<br>เชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที.....66                                            |
| 4.15   | พลังงานไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิล ในการ<br>เชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที.....67                                            |
| 4.16   | พลังงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ของชุดสปินเดิล และชุดมอเตอร์<br>แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 .....68                                                                            |
| 4.17   | อุณหภูมิสูงสุดการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024 .....70                                                                                                                       |
| 4.18   | ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของชุดสปินเดิล และอุณหภูมิในการเชื่อม<br>ที่ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที ขนาดปากของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร<br>มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา .....71 |
| 4.19   | อุณหภูมิสูงสุดการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083 .....72                                                                                                                       |
| 4.20   | ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของชุดสปินเดิล และอุณหภูมิในการเชื่อม<br>อะลูมิเนียม 5083 ที่ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดิน<br>เชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที .....73        |
| 4.21   | ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024.....74                                                                                                                                   |
| 4.22   | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น Stress และความเครียด Strain ในการเชื่อม<br>อะลูมิเนียม 2024 .....74                                                                                       |
| 4.23   | เปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงของแนวเชื่อม .....75                                                                                                                                            |
| 4.24   | ค่าความแข็งแรงดึงของการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอะลูมิเนียม<br>5083 .....76                                                                                                        |
| 4.25   | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น Stress และความเครียด Strain การเชื่อม<br>โดยใช้ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวน 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วใน<br>การเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที.....77    |
| 4.26   | เปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงของแนวเชื่อม ในอะลูมิเนียม 5083 .....78                                                                                                                         |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                                                      |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.27   | โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้ปาเครื่องมือกวนขนาด 15 มิลลิเมตร .....78 |
| 4.28   | โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมในอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้ปาเครื่องมือกวนขนาด 9 มิลลิเมตร .....79                |
| 4.29   | ความแข็งของแนวเชื่อมในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้เครื่องมือกวนขนาด 15 มิลลิเมตร .....80              |
| 4.30   | ความแข็งของแนวเชื่อมในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้เครื่องมือกวนขนาด 9 มิลลิเมตร .....81               |
| 4.31   | ความแข็งของแนวเชื่อม โดยใช้เครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร .....82                                             |
| 4.32   | กราฟพาริตดผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ในอะลูมิเนียม 2024 .....82                                  |
| 4.33   | ลักษณะของข้อมูลในการวิเคราะห์ความแปรปรวน .....83                                                          |
| 4.34   | อิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง .....85                                                  |
| 4.35   | อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง .....85                                                  |
| 4.36   | อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 .....87                      |
| 4.37   | กราฟพาริตดผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม 5083 .....88          |
| 4.38   | ลักษณะของข้อมูลในการวิเคราะห์ความแปรปรวน .....88                                                          |
| 4.39   | อิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง .....90                                                  |
| 4.40   | อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง .....90                                                  |
| 4.41   | อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 .....91                      |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในภาคการผลิตนั้น การเชื่อมโลหะ เป็นกระบวนการต่อวัสดุโดยให้เนื้อโลหะรวมตัวเข้าด้วยกันด้วยวิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลาย และเพิ่มเนื้อโลหะลงในบ่อหลอมละลายขณะที่วัสดุหลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง การเชื่อมมีหลายประเภท เช่น การเชื่อมอาร์ค การเชื่อมแก๊สปกคลุม การเชื่อมด้านทาน และการเชื่อม Laser แต่การเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า หรือวิธีที่ทำให้เกิดการหลอมละลายนั้นทำให้เกิดการปล่อยมลพิษสู่อากาศ จากข้อมูลจากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษใน 14 จังหวัด พบว่าการปล่อยมลพิษทางอากาศ มีแหล่งกำเนิดมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ การคมนาคมขนส่ง การผลิตไฟฟ้า และอุตสาหกรรมภาคการผลิต ตามลำดับ (Greenpeace.org, 2018) โดยจากมลพิษที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรม เช่น คิวโนเชื่อม และก๊าซพิษ เป็นสารอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ในคิวโนเชื่อมนั้นประกอบด้วยส่วนผสมที่ซับซ้อนของโลหะ ออกไซด์ ซิลิเกต และฟลูออไรด์ การสูดดมคิวโนเชื่อม และก๊าซพิษในปริมาณมากเป็นเวลานาน ส่งผลต่อสุขภาพพนักงานในระยะยาว อาจมีความเสี่ยงในการเกิดประสาทเสื่อม หรือโรคทางระบบประสาท โรคอัลไซเมอร์ (AD) โรคลมชัก (ED) และโรคเส้นโลหิตตีบ (Humayan KabirRanaa, 2019) อีกทั้งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักจากองค์ประกอบของฟุ้งโลหะในงานเชื่อมพบว่ามีโครเมียม และนิกเกิล ความเข้มข้นสูง โดยผลการวิจัยของ (ภัครดา แสนสุขสม, 2561) พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ผู้ปฏิบัติงานเชื่อมได้รับนั้นสูงเกินกว่าที่ประชากรทั่วไปได้รับจึงมีโอกาสเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยจากการสัมผัสโลหะหนักขณะปฏิบัติงาน ในปัจจุบันปัญหามลพิษจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ที่สะสมในเขตพื้นที่เมืองอยู่ในระดับที่แย่ โดยในประเทศไทยมีประชากรประมาณ 37,500 คน เกิดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรจากปัญหาดังกล่าว อีกทั้งข้อมูลในปี 2558 พบว่าหลายพื้นที่มีแนวโน้มการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีค่าเกินเกณฑ์ที่กำหนด (Greenpeace.org, 2018) จากข้อมูลล่าสุดใน State of Global Air พบว่ามีจำนวนผู้เสียชีวิตจากโรคที่เกิดจากมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ในประเทศไทย และในภูมิภาคอาเซียนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี (State of global air .org, 2019)

จากปัญหาการเกิดมลพิษ และก๊าซพิษในการเชื่อมโลหะแบบหลอมละลาย จึงมีการคิดค้นการเชื่อมโลหะที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ คือ วิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยถูกคิดค้นปี 1991

วิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นการเชื่อมโลหะในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายเรียกว่าการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid-state) มีข้อดีได้แก่ โครงสร้างจุลภาคเล็กละเอียด คุณสมบัติทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมดี ไม่สูญเสียธาตุผสม และไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาสภาวะโลกร้อน (R.S. Mishra and Z.Y. Ma, 2005) ต่อมา มีข้อบังคับด้านกฎหมายในปัจจุบันเกี่ยวกับการปล่อยควันไอเสียของอุตสาหกรรมยานยนต์ ทำให้ผู้ผลิตรถยนต์ต้องลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเป็นวิธีการสำหรับการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และวัสดุโลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ได้แก่ เหล็ก เหล็กหล่อ โลหะผสมอะลูมิเนียม โลหะผสมแมกนีเซียม จึงมีการคาดการณ์ว่าในอนาคตจะมีการใช้อะลูมิเนียมในรถยนต์หรือรถยนต์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเพื่อทดแทนโลหะประเภทเหล็ก (A.W. Orłowicz, 2015) จากรายงานของ (Thomas WM., 2006) ระบุว่าเทคโนโลยีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีการพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ตั้งแต่ปี 1998 เมื่อสถาบันการเชื่อมของอังกฤษ TWI ร่วมมือกับบริษัท BMW, บริษัท Daimler-Chrysler, บริษัท General Motors และอีกหลายหน่วยงาน จนปัจจุบันถูกนำไปใช้ในการผลิตรถยนต์และรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อประสานอะลูมิเนียมผสมกับเหล็ก ในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกวิจัยและศึกษาอย่างกว้างขวาง จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแรงกระทำตามแนวแกน แรงบิด พลังงาน รูปร่างเครื่องมือกวน และวัสดุที่ใช้ในกระบวนการนั้น มีความสำคัญในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ค่าของแรงกระทำตามแนวแกน และแรงบิดของเครื่องมือควรอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยที่เครื่องจักรสามารถรับภาระงานได้ (B.T. Gibson, 2014; H. Su, 2013; P. Shahi, 2014) อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ควรสามารถควบคุมแรงกระทำตามแนวแกน และแรงบิดที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร โดยการปรับพารามิเตอร์ในการเชื่อมเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหรือปัญหาที่ส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการเสียหาย ดังนั้นการสร้างเครื่องจักรสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และศึกษาผลกระทบในการเชื่อมนั้น จึงเป็นแนวทางพัฒนานวัตกรรมสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเข้าสู่ภาคอุตสาหกรรม

วิทยานิพนธ์นี้ ทำการศึกษาผลกระทบของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็ก ต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม โดยใช้องค์ความรู้ทางวิศวกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อประโยชน์ในการพัฒนานวัตกรรมสู่ภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็กต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

สถานที่ในการดำเนินงานวิจัยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.1 เชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็กที่ออกแบบและสร้างขึ้นเอง

1.3.2 ขอบเขตด้านการออกแบบ

1) ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรในแนวแกน X 150 มิลลิเมตร และระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแนวแกน Z 50 มิลลิเมตร

2) ขนาดโต๊ะรองรับชิ้นงานกว้าง 200 มิลลิเมตร และยาว 200 มิลลิเมตร

1.3.3 ขอบเขตด้านการทดลอง

1) ใช้อะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 และ เกรด 5083 ขนาดของชิ้นงาน 100 X 50 มิลลิเมตร ความหนา 4 มิลลิเมตร

2) เครื่องมือกวนมีขนาดบ่า 9 และ 15 มิลลิเมตร

3) ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อม 1,000 - 1,800 รอบต่อนาที

4) มุมเอียงของเครื่องมือกวน 1 และ 3 องศา

1.3.4 ขอบเขตด้านการทดสอบ

1) ทดสอบแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM E8

2) วัดกระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

## 1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ออกแบบต้นแบบเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.4.2 ดำเนินการสร้างต้นแบบสำหรับเครื่องเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวน

1.4.3 ทดสอบประสิทธิภาพ

1.4.4 วิเคราะห์ผล

1.4.5 สรุปผล

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบวิธีการออกแบบและวิธีการสร้างเครื่องจักรในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับอะลูมิเนียมผสม ตลอดจนประสิทธิภาพการทำงาน และการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของเครื่องจักรต้นแบบ

1.5.2 ทราบถึงอิทธิพลจากตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ด้วยเครื่องจักรต้นแบบ ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่นำไปพัฒนาเครื่องจักรในภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ผู้วิจัยได้กล่าวถึงทฤษฎีของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การออกแบบเครื่องมือ เครื่องจักรกล ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การออกแบบการทดลอง และรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยแสดงดังนี้

#### 2.1. การเชื่อมโลหะ (Metal Welding)

การเชื่อมโลหะ หมายถึงกระบวนการที่ทำให้โลหะหลอมละลายติดกัน โดยใช้ความร้อนจากการอาร์ค (Arc) ที่จะเกิดขึ้นระหว่างโลหะงานกับลวดเชื่อม อุณหภูมิในการเชื่อมเกิดขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 3,300 – 5,500 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้โลหะหรือชิ้นงานที่ถูกเชื่อมหลอมละลายพร้อมกับปลายของลวดเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน

การเชื่อมโลหะ (Metal Welding) หมายถึงการต่อโลหะ 2 ชิ้นให้ติดกันด้วยการให้ความร้อนกับโลหะจนหลอมละลายติดเป็นเนื้อเดียวกัน หรือใช้การเติมลวดเชื่อมเป็นตัวให้ประสานกรรมวิธีในการเชื่อมโลหะที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีดังต่อไปนี้คือ

##### 1) การเชื่อมแก๊ส (Gas Welding)

เป็นการเชื่อมในประเภทการเชื่อมหลอมละลาย ความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมเกิดจากการเผาไหม้ระหว่างแก๊สอะเซทิลีนซึ่งเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจน อุณหภูมิในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ให้ความร้อนสูง 3,200 องศาเซลเซียส และกระบวนการเชื่อมแก๊ส ไม่มีเขม่าหรือควัน

##### 2) การเชื่อมไฟฟ้า (Arc Welding)

การเชื่อมไฟฟ้า เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเชื่อมโลหะโดยวิธีการเชื่อม "อาร์ค" ความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมเกิดจากประกายอาร์คระหว่างชิ้นงานและลวดเชื่อมซึ่งเมื่อลวดเชื่อมหลอมละลายจะทำหน้าที่ป้อนเนื้อโลหะให้แก่แนวเชื่อม

##### 3) การเชื่อม TIG (Tungsten Inert Gas)

เป็นวิธีการเชื่อมโลหะที่ใช้ความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดทั้งสแตนกับชิ้นงาน โดยมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมในบริเวณเชื่อมหรือบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้บรรยากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยาตรงบริเวณที่เชื่อม



#### 4) การเชื่อม MIG (Metal Inert Gas Welding)

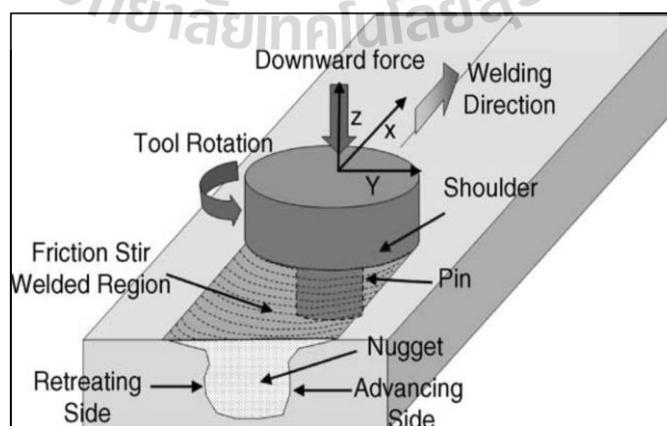
การเชื่อม MIG เป็นกระบวนการเชื่อมแก๊สปกคลุม ความร้อนในการเชื่อมเกิดจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน โดยลวดเชื่อมที่ใช้จะเป็นลวดเชื่อมเปลือย ในการเชื่อมมีการส่งป้อนอย่างต่อเนื่องไปยังบริเวณอาร์คอีกทั้งยังทำหน้าที่เป็น โลหะเติมลงยังบ่อหลอมละลาย และบริเวณบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมไปด้วยแก๊สเฉื่อยเพื่อไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศ

#### 3) การเชื่อม Laser

การเชื่อมด้วยลำเลเซอร์ (Laser beam welding, LBW) คือกระบวนการหนึ่งของการเชื่อมวัสดุ โดยใช้พลังงานจากลำเลเซอร์หลอมชิ้นงานบริเวณที่ลำเลเซอร์ตกกระทบ โดยพลังงานที่เข้าสู่ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูง ทำให้สามารถเชื่อมรอยเชื่อมแคบ และลึกได้ เหมาะกับการเชื่อมในงานที่ต้องการการซึมลึก และการเชื่อมด้วยลำเลเซอร์นั้นอาศัยพลังงานความเข้มสูง

## 2.2 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

(R.S. Mishra and Z.Y. Ma, 2005) กล่าวว่ากระบวนการเชื่อมด้วยทานแบบกวน (FSW) ถูกคิดค้นโดย W.M. Thomas ในปี 1991 จาก (TWD) The Welding Institute of UK เป็นเทคนิคการเชื่อมต่อแบบไม่หลอมละลาย เริ่มทดลองกับอะลูมิเนียมผสม แนวคิดพื้นฐานของ FSW คือเครื่องมือเชื่อมออกแบบลักษณะพิเศษเหมือนพิน ทำการหมุนกดลงในชิ้นงาน เครื่องมือจะทำหน้าที่ทำให้เกิดความร้อนในวัสดุ ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของวัสดุและเครื่องมือ ทำให้วัสดุเปลี่ยนเป็นสภาวะพลาสติก และเคลื่อนที่ไปจากด้านหน้าหมุนไปด้านหลังตามการหมุนของพินกวน เมื่อพินกวนเคลื่อนที่ผ่านไปวัสดุจะติดกัน กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (R.S. Mishra and Z.Y. Ma, 2005)

## 2.2.1 ตัวแปรในกระบวนการเชื่อมแบบเสียดทาน

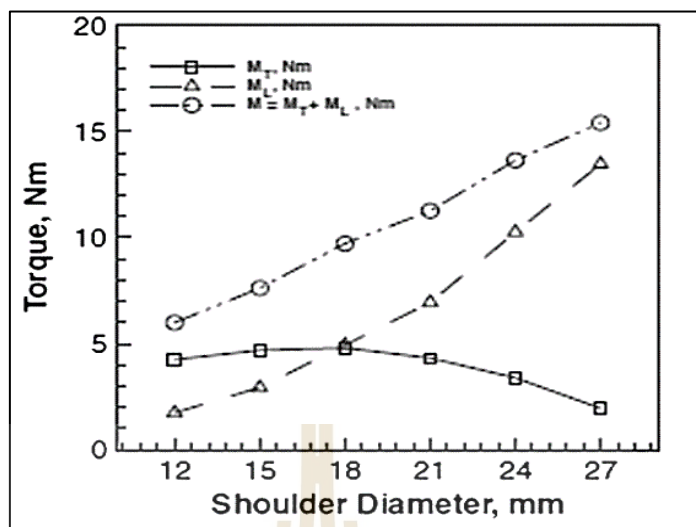
(R.S. Mishra and Z.Y. Ma, 2005) กล่าวว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน นั้นเป็นการเคลื่อนย้ายวัสดุที่เกิดการเสียดทานในสภาวะพลาสติก ขณะเกิดความร้อนเกิดการรวมตัวของเนื้อวัสดุ ตัวแปรในการเชื่อมคือ รูปทรงของเครื่องมือและการออกแบบข้อต่อมีผลอย่างมากต่อรูปแบบการไหลของวัสดุและอุณหภูมิ

### 1) ลักษณะรูปทรงของเครื่องมือสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

(A. Arora, 2011) กล่าวว่ารูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือมีผลต่ออัตราการเกิดความร้อนในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเกิดแรงบิด และความร้อนทางกลล้วนเกิดโดยเครื่องมือกวน การไหลของวัสดุพลาสติกในชิ้นงานยังได้รับผลกระทบจากลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือกวน เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางบ่าเครื่องมือกวน พื้นผิวเครื่องมือกวน รวมถึงรูปร่างและขนาด จากการทดลองพบว่าเครื่องมือที่กวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางบ่าที่ดีที่สุดจะส่งผลให้ได้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงสุด ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานจำเป็นต้องกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางบ่าที่เหมาะสม รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.2 และการเกิดแรงบิดจากเครื่องมือกวนแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 เครื่องมือกวน สำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (A. Arora, 2011)



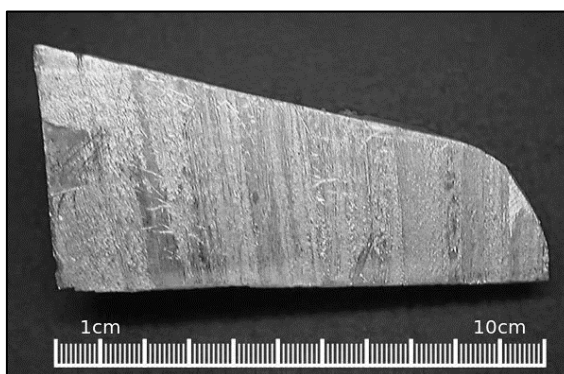
รูปที่ 2.3 แรงบิดที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือ กระบวนการเชื่อมเลเซอร์แบบกวน (A. Arora, 2011)

## 2) ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม

(D. Trimble, 2015) กล่าวว่าความเร็วหมุนของเครื่องมือกวนเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดความร้อนเลเซอร์ในการเชื่อม การเชื่อมที่ความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือกวนต่ำ ส่งผลให้การเปลี่ยนรูปวัสดุไม่เพียงพอ และขณะที่การเชื่อมที่การหมุนของเครื่องมือกวนความเร็วที่สูงกว่าค่าที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดความร้อนมากเกินไปทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง

## 2.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็น โลหะที่ความแข็งแรงน้อยกว่าเหล็กกล้าแต่น้ำหนักเบา มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดออกซิเดชัน ชั้นบาง ๆ ที่ผิวปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ อะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็กและไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีสมบัติต้านแรงดึงประมาณ 49 MPa และสูงถึง 450 MPa ถ้าเป็นโลหะอะลูมิเนียมผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้า สามารถตัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย อะลูมิเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากชั้นผิวออกไซด์ อะลูมิเนียมมีการสะท้อนแสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 200 - 400 nm (UV) และ 3000 - 10,000 nm ส่วนในช่วงที่มองเห็นได้ คือ 400 - 700 nm โลหะเงินสะท้อนแสงได้ดีกว่าเล็กน้อย อะลูมิเนียมเป็น โลหะที่ตัดได้ง่ายรองจากทองคำ สามารถนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะที่จะทำหม้อหุงต้มอาหาร โลหะอะลูมิเนียมแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อะลูมิเนียม (Wikipedia.org, 2020)

ประเทศออสเตรเลียมีการทำเหมืองบอไซด์มากกว่า 40 % ของทั้งโลก รองลงมา มี บราซิล และจาไมกา ในขณะที่อเมริกาเองเคยเป็นผู้ผลิตที่สำคัญเมื่อ 100 ปีที่แล้ว แต่ปัจจุบันไม่มีแล้ว

อะลูมิเนียมผสมเป็นวัสดุที่ได้จากการหลอมร่วมกับโลหะชนิดอื่นตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป ได้แก่ ทองแดง แมกนีเซียม แมงกานีส โครเมียม ซิลิกอน นิกเกิล คีนุก สังกะสี เป็นต้น เพื่อให้มีสมบัติทนต่อแรงดึง นอกจากนี้ยังมีข้อยกเว้นเฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สาม และสี่แสดงถึงปริมาณอะลูมิเนียมที่เป็นจุดเทคนิคสองตำแหน่งที่ปรากฏภายหลัง 99% เช่น เกรด 1060 และเกรด 1080 หมายถึงอะลูมิเนียมขึ้นรูปที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ โดยมีการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมแบ่งตามส่วนผสมทางเคมีโดย The International Alloy Designation System ได้ 8 กลุ่ม ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป

| สัญลักษณ์ | ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม            |
|-----------|------------------------------------------------|
| 1XXX      | อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0% |
| 2XXX      | ทองแดง                                         |
| 3XXX      | แมงกานีส                                       |
| 4XXX      | ซิลิกอน                                        |
| 5XXX      | แมกนีเซียม                                     |
| 6XXX      | แมกนีเซียม กับ ซิลิกอน                         |
| 7XXX      | สังกะสี                                        |
| 8XXX      | ธาตุอื่น ๆ                                     |

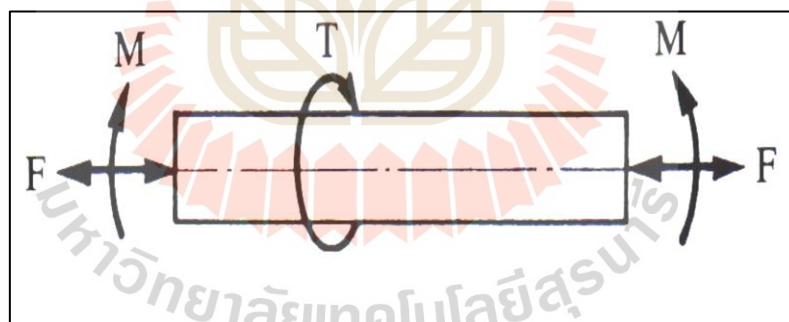
- 1) โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure aluminum) โดยมีอะลูมิเนียมไม่ต่ำกว่า 99.0% สัญลักษณ์คือ 1XXX
- 2) โลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Aluminum-copper alloys) เป็นโลหะอะลูมิเนียม ที่ผสมทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) แต่มีข้อเสียคือเกิดการกัดกร่อนจากแรงกระทำ (Stress corrosion cracking) ได้ง่าย สัญลักษณ์คือ 2XXX ตามส่วนผสมทางเคมีใช้สำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยทำการอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เช่น หมุดย้ำสำหรับเครื่องบิน กระดาษลือรดถัง
- 3) โลหะอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (Aluminum-manganese alloys) สัญลักษณ์คือ 3XXX ตามส่วนผสมทางเคมีใช้ทำภาชนะหุงต้ม อุปกรณ์เก็บอาหารและสารเคมี กระจ่างเครื่องดัดที่มีความแข็งแรงสูงกว่า 1XXX
- 4) โลหะอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (Aluminum-silicon alloys) สัญลักษณ์คือ 4XXX ตามส่วนผสมทางเคมีซิลิกอนที่ผสมในโลหะอะลูมิเนียม ทำให้โลหะผสมมีน้ำหนักเบา คุณสมบัติการไหลตัวที่ดี เหมาะที่หล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน
- 5) โลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Aluminum-magnesium alloys) สัญลักษณ์คือ 5XXX ตามส่วนผสมทางเคมี ใช้สำหรับผลิตอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเดินเรือทะเล
- 6) โลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Aluminum-magnesium-silicon alloys) มีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการตกแต่งผิวสุดท้าย เช่น การกลึง และสามารถเพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) สัญลักษณ์คือ 6XXX ตามส่วนผสมทางเคมี ใช้สำหรับทำเฟอร์นิเจอร์ (กรอบประตู หน้าต่าง) อิเล็กทรอนิกส์ และใช้ในงานสถาปัตยกรรม
- 7) โลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Aluminum-zinc alloys) สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) ได้ โดยสามารถเพิ่มจนมีความแข็งแรงสูงมากกว่าโลหะอะลูมิเนียมกลุ่มอื่นๆ สัญลักษณ์คือ 7XXX ตามส่วนผสมทางเคมี ใช้ผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน
- 8) โลหะอะลูมิเนียมผสมธาตุอื่น ๆ (Miscellaneous aluminum alloys) เช่น โลหะอะลูมิเนียม ผสมลิเทียม สัญลักษณ์คือ 8XXX ตามส่วนผสมทางเคมีใช้ผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน



## 2.4 เครื่องจักรกล

### 2.4.1 การออกแบบเพลลา

(วิธีทฤษฎี อิงภากรณ์ และชาญ อดุลงาน, 2556) กล่าวไว้ในปี พ.ศ. 2497 การออกแบบเพลลาส่งกำลังมีวิธีการคำนวณหาขนาดของเพลลาโดยสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASME) แม้ว่าจะผ่านมานาน การออกแบบเพลลาตามโค้ดของ ASME มีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน วิธีการดังกล่าวนี้ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ไม่พิจารณาถึงความล้าหรือความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบนเพลลา ซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Design Method) เพลลาอาจจะต้องรองรับภาระต่าง ๆ ได้แก่ แรงดัด แรงดึง แรงอัด หรือแรงบิด ซึ่งภาระเหล่านี้อาจกระทำอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว หรือกระทำพร้อมกัน ในขณะเดียวกันในการออกแบบเพลลา โดยสิ่งที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาคือ ความแข็งแรงสถิตย์ และความแข็งแรงด้านความล้า เพลลาอันหนึ่งอาจอยู่ภายใต้ความเค้นคงที่ ความเค้นสลับ และความเค้นแบบซ้ำในเวลาเดียวกัน การออกแบบเพลลาต้องรักษาระยะโค้งของเพลลาให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด การให้ขนาดเพลลานั้นต้องพิจารณาระยะโค้งก่อน แล้วมาวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้น เพราะว่าถ้าเพลลาที่นำมามีความแข็งแรงพอที่จะไม่ให้เกิดระยะโค้งตัวมากแล้วความเค้นที่เกิดขึ้นก็จะอยู่ในช่วงที่มีความปลอดภัย ในการหาสมการสำหรับออกแบบเพลลาให้พิจารณาเพลลาในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เพลลาอยู่ภายใต้แรงต่าง ๆ (วิธีทฤษฎี อิงภากรณ์ และชาญ อดุลงาน, 2556)

#### 1) การคำนวณหาความเค้นของเพลลา

การออกแบบขนาดของเพลลาโดยปกติทั่วไป พิจารณาเฉพาะกำลังงานและภาระงาน โดยคำนวณตรวจความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลลา เพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัยเพียงพอ จึงพิจารณาถึงความแรงแ้งและความเร็ววิกฤติ การออกแบบเพลลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่วัฏจักร เพราะเพลลาหมุนอยู่ตลอดเวลา นอกจากนั้นแรงที่กระทำอาจจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาก็ได้ ดังนั้นการเสียหายของเพลลาจึงเกิดมาจากความล้าเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงมีตัวประกอบความล้า

(Fatigue Factor) มาเกี่ยวข้องกับค่าตัวประกอบความล้าสามารถเลือกใช้ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ เพื่อให้เพลามีมาตรฐานเหมือนกัน องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศจึงได้กำหนดขนาดมาตรฐานของเพลารูปเป็นขนาด (Nominal Size) ใน ISO/R 775-1969 ให้ผู้ออกแบบเลือกใช้ทั้งนี้เพื่อสอดคล้องกับขนาดของแบริ่งที่ใช้รองรับเพลาด้วย

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\sigma\pi}} \quad 2.1$$

เมื่อ  $d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)  
 $F$  = แรงที่กระทำ (นิวตัน)  
 $\sigma$  = ความเค้นในการออกแบบเพลาท่อกับ (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau_p} \sqrt{(C_t T)^2 + (C_m M)^2} \quad 2.2$$

เมื่อ  $d$  = ความโตเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลา  
 $\tau_p$  = ความเค้นเฉือนในเพลา ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้  
 $C_t$  = ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด  
 $C_m$  = ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการดัด  
 $T$  = โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นกับเพลา  
 $M$  = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับเพลา



ตารางที่ 2.2 แสดงค่าตัวประกอบความล้า

| รายละเอียดของการใช้งาน                                                               | ตัวประกอบความล้า              |                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                                                                      | $C_m$                         | $C_t$                         |
| เพลายูนิ่ง :<br>แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้า ๆ<br>แรงกระตุก                           | 10.<br>1.5 – 2.0              | 10.<br>1.5 – 20.              |
| เพลามวน :<br>แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้า ๆ<br>แรงกระตุกอย่างเบา<br>แรงกระตุกอย่างแรง | 1.5<br>1.5 – 2.0<br>2.0 – 3.0 | 1.0<br>1.0 – 1.5<br>1.5 – 3.0 |

ที่มา (วิธีที่ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน, 2556)

## 2) ความเค้นในการออกแบบ

(วิธีที่ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน, 2556) กล่าวว่าวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนภายในเครื่องจักรต้องออกแบบให้อยู่ภายใต้แรงกระทำที่มีความเค้นไม่เกินความเค้นที่จุดครากของวัสดุ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 และค่าความปลอดภัยในการออกแบบซึ่งสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.3

$$\sigma_d = \frac{\sigma_u}{N} \quad 2.3$$

เมื่อ  $\sigma_d$  = ความเค้นในการออกแบบเพลลา (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

$\sigma_u$  = ความแข็งแรงของเหล็ก St 37,370 (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

N = ค่าความปลอดภัย

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความปลอดภัย

| ชนิดของแรง                                             | เหล็กเหนียวและโลหะเหนียว         |                             | เหล็กหล่อและโลหะเปราะ       |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                        | ความปลอดภัยในการใช้งาน ( $N_y$ ) | ความปลอดภัยสูงสุด ( $N_u$ ) | ความปลอดภัยสูงสุด ( $N_u$ ) |
| แรงยู่หนึ่งแรงซ้ำทิศทางเดียวหรือแรงกระแทกเล็กน้อย      | 1.5-2                            | 3-4                         | 5-6                         |
|                                                        | 3                                | 6                           | 7-8                         |
| แรงซ้ำสองทิศทางหรือแรงกระแทกเล็กน้อยแรงกระแทกอย่างหนัก | 4                                | 8                           | 10-12                       |
|                                                        | 5-7                              | 10-15                       | 15-20                       |

#### 2.4.2 ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

เครื่องจักรกลหมายถึงเครื่องมือชนิดหนึ่งประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนต่าง ๆ หลายชิ้นส่วน เพื่อทำให้บรรลุจุดมุ่งหมายในการใช้งานเฉพาะเจาะจงอย่างหนึ่ง เครื่องจักรเป็นอุปกรณ์ที่มีพลังขับเคลื่อนมักจะเป็นพลังงานเชิงกล หรือพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น หรือบ่อยครั้งก็ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลัง ในอดีตอุปกรณ์จะเรียกว่าเป็นเครื่องจักรได้ต่อเมื่อมีส่วนที่ขยับหรือเคลื่อนที่ได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์พัฒนาอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็นต้องมีงานโดยไม่มีต้องมีส่วนที่ขยับหรือเคลื่อนที่ได้

##### 1) เซอร์โวมอเตอร์

เป็นมอเตอร์ที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ได้ ไม่ว่าจะเป็นระยะ ความเร็ว หรือมุมการหมุนของมอเตอร์ โดยใ้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) เซอร์โวมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมเครื่องจักรกลหรือระบบการทำงานนั้น ๆ ให้เป็นไปตามความต้องการ เช่นควบคุมความเร็ว (Speed) ควบคุมแรงบิด (Torque) ควบคุมตำแหน่ง (Position) หรือควบคุมระยะทางในการเคลื่อนที่ (Position Control) ซึ่งมอเตอร์ทั่วไปไม่สามารถควบคุมแบบนี้ได้ โดยให้ผลลัพธ์ตามความต้องการที่ความแม่นยำสูง เซอร์โวมอเตอร์มีหน่วยในการบอกขนาดเป็นวัตต์ แสดงถึงกำลังของเซอร์โวมอเตอร์ตั้งแต่ 50 W -15 KW ทำให้การใช้งานมีความหลากหลาย เซอร์โวมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.6



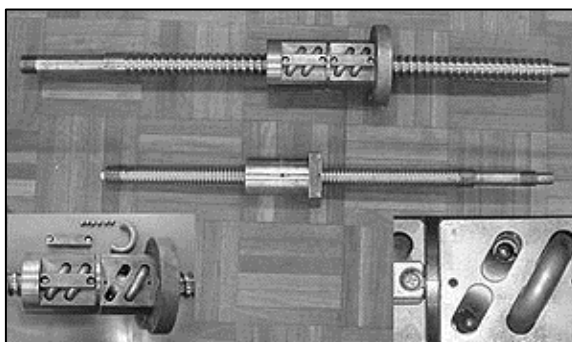
รูปที่ 2.6 เซอร์โวมอเตอร์

## 2) สเต็ปป์มอเตอร์

สเต็ปป์มอเตอร์เป็นมอเตอร์ต้นกำลังอย่างหนึ่งที่สามารถควบคุมการหมุนโดยนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุม และเป็นมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานที่ต้องการตำแหน่ง และทิศทางที่แน่นอน การทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์จะขับเคลื่อนทีละขั้น (Step) องศาการหมุน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์ โดยสเต็ปป์มอเตอร์แตกต่างจากมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป (DC MOTOR) คือการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงจะหมุนไปแบบต่อเนื่องไม่สามารถหมุนเป็นแบบสเต็ปได้ดังนั้น หากต้องการกำหนดตำแหน่งจึงควบคุมได้ยาก ส่วนใหญ่จะใช้สเต็ปป์มอเตอร์ทำการควบคุมโดย เช่น เครื่องพิมพ์ หรือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

## 3) บอลสกรู

บอลสกรู คือ ชิ้นส่วนส่งกำลังที่ใช้การเปลี่ยนการเคลื่อนที่ในแนวหมุน เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น หรือเปลี่ยนจากแรงบิดเป็นแรงผลัก ข้อดีคือมีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง บอลสกรูสามารถรับแรงได้มาก มีอายุการใช้งานยาวนาน ข้อดีของ บอลสกรูจะมีเสียงดังน้อยกว่าดีกว่าถ้าเทียบกับลีดสกรู โดยปกติแล้วเกลียวบนเพลลาและนัตของลีดสกรู จะมีการเสียดสีกันโดยตรงในการเคลื่อนที่ของตัวนัตทำให้มีการสึกหรอสูงและมีความแม่นยำต่ำ แต่ในกรณีของบอลสกรูจะมีเม็ดลูกปืนอยู่ระหว่างเพลลาและนัตทำให้ลดการเสียดทาน เพิ่มประสิทธิภาพกับความแม่นยำบอลสกรู แสดงดังรูปที่ 2.7

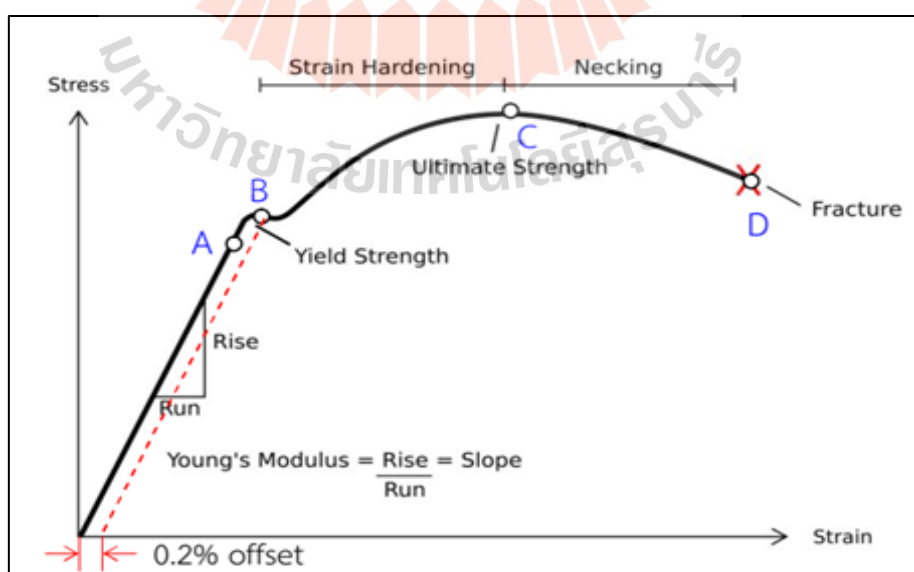


รูปที่ 2.7 บอลสกรู (Wikipedia.org, 2021)

## 2.5 การทดสอบวัสดุ

### 2.5.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

ความทนแรงดึงของวัสดุ คือ ความต้านทานของวัสดุนั้นต่อการยืด (Elongation) หรือการแตกหัก (Breaking) เมื่อมีแรงดึงวัสดุ พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุ ส่วนมากขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นต้องคำนึงถึงความเร็วที่ทำให้ความเค้นด้วย เช่น ถ้าดึงวัสดุอย่างรวดเร็ว ทันทีทันใดอาจทำให้วัสดุขาดออกได้ แต่ถ้าแรงเท่าๆ กัน อาจทำให้วัสดุยืดออกเพียงอย่างเดียว เท่านั้น ความต้านทานต่อการขาดของวัสดุมีค่าสูงขึ้น ในการทดสอบความทนแรงดึงมักเขียนกราฟ ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

ความเค้น (Stress) คือ แรงที่ใช้เพื่อทำให้เกิดการเสียรูป (Deformation) ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ของชิ้นทดสอบหรือบอกได้ว่า ความเค้นเป็นอัตราส่วนที่ใช้ต่อพื้นที่หน้าตัด

ความเครียด (Strain) คือ อัตราส่วนของส่วนที่เพิ่มขึ้นต่อความยาวเดิมของชิ้นทดสอบหรือความยาวที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยความยาวเริ่มต้น

1) จุด A เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) ภายใต้อัตราส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปยังขนาดเท่าเดิม

2) จุด B เรียกว่า จุดคราก (Yield Point) ค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ เป็นจุดที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป

3) จุด C เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) เป็นค่าความสูงที่สุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแยกออกจากกัน (Fracture) วัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปพลาสติกได้มาก ค่านี้เป็นดัชนีเปรียบเทียบสมบัติความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ

4) จุด D เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture)

ความทนแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) คือค่าความเค้นที่มากที่สุดที่ชิ้นงานสามารถทนได้ระหว่างการทดสอบ เมื่อปรากฏความเค้นที่มากที่สุดที่จุดคราก ก็จะเป็นค่าความทนแรงดึงที่จุดคราก แต่เมื่อเกิดความเค้นมากที่สุดที่จุดขาดก็กำหนดว่าเป็นความทนแรงดึงที่จุดขาดสำหรับความทนแรง กำหนดได้โดยค่าแรงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน

$$\text{ความทนต่อแรงดึง} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดของชิ้นงาน ณ จุดทดสอบ}} \quad 2.4$$

การยืดตัว (%Elongation) คือ การยืดออกของชิ้นงานที่แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความยาวเริ่มต้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของความยาวของชิ้นงานที่ถูกดึงถ้าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (%Elongation At Break) การคิดเปอร์เซ็นต์การยืดขณะที่ชิ้นงานขาดหรือแตกออก สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{\text{ความยาวที่เกิดขึ้น ณ จุดขาด}}{\text{ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ}} \times 100 \quad 2.5$$

มอดูลัสยังก์ (Young's Modulus) หรือมอดูลัสแบบยืดหยุ่น (Elastic Modulus) คืออัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้น ค่ามอดูลัสของยังก์เป็นสิ่งที่วัดความแข็งแกร่งหรือแข็งตึง (Stiffness) ของวัสดุซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการแปรรูปหรือการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ขณะรับแรง การหาค่ามอดูลัสยังก์สามารถหาได้จากกราฟความเค้น-ความเครียด โดยมอดูลัสแบบยืดหยุ่นจะเป็นความชันในช่วงเริ่มต้นที่ความเค้นและความเครียดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

$$\text{มอดูลัสยังก์} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} \quad 2.6$$

พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น - ความเครียดเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ ถ้าวัสดุใดมีพื้นที่ใต้กราฟมากแสดงว่าเป็นวัสดุที่มีความเหนียวมาก ส่วนวัสดุใดมีพื้นที่ใต้กราฟน้อยแสดงว่าเป็นวัสดุที่มีความเปราะ

## 2.6 กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า หมายถึงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมหนึ่ง จะไหลมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้านทานของวงจร ใช้แทนด้วยตัว  $I$  มีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์ (A) ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current AC.) เป็นกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลกลับไปกลับมาอย่างรวดเร็วตลอดเวลาระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบ ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นกระแสไฟฟ้าที่เราใช้ตามอาคารบ้านเรือน เป็นไฟฟ้าที่เกิดจากการหมุนของไดนาโมกระแสสลับจากเครื่องจักรหรือแหล่งพลังงานอื่น ๆ เช่น พลังน้ำจากเขื่อน หรือพลังงานลม เป็นต้น

กำลังไฟฟ้า (Electric Power) คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) หรือจูลต่อวินาที กำลังไฟฟ้ามีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นต่ออยู่ โดยกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า

การคำนวณหา กำลังไฟฟ้า ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้า แต่ละชนิดหาได้จากพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นใช้ไปในเวลา 1 วินาที ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า กำลังไฟฟ้า (วัตต์) = พลังงานไฟฟ้า (จูล)/เวลา (วินาที)



$$P = \frac{W}{t} \quad 2.7$$

|       |   |   |                                     |
|-------|---|---|-------------------------------------|
| เมื่อ | P | = | กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt) |
|       | W | = | พลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น จูล (J)    |
|       | t | = | เวลา มีหน่วยเป็น วินาที (S)         |

ขณะที่เครื่องใช้ไฟฟ้ากำลังทำงาน เช่น กำลังเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงสว่าง หรือให้พลังงานความร้อน หรือให้พลังงานกล ให้พลังงานเสียง เมื่อเวลาใช้งานเพิ่มขึ้น ย่อมเกิดความต้านทานไฟฟ้าขึ้น ทำให้พลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าเกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า ทำให้ค่า กำลังไฟฟ้า (P) กระแสไฟฟ้า (I) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าลดลง เกิดความร้อนสูงสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก ดังนั้น

พลังงานไฟฟ้า (Electric Energy) W หมายถึง ปริมาณ ไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าใช้ไปทั้งหมด หรือ แห่่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายให้ทั้งหมด คิดในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง มีหน่วยเป็น วัตต์ชม.(Wh.) ไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่สามารถทำงานได้ และมีความสำคัญมากเพราะนำมาใช้ กับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่อำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิต เราใช้ประโยชน์จากกระแสไฟฟ้า ที่ผลิตขึ้นผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยต่อสายไฟระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น พัดลม โทรทัศน์ วิทยุ เตารีด เมื่อเปิดสวิตช์แล้วเครื่องใช้ไฟฟ้าจะทำงาน โดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานแสง พลังงานเสียง พลังงานกล เป็นต้น

$$W = Pt \quad 2.8$$

|   |   |                                     |
|---|---|-------------------------------------|
| W | = | พลังงานไฟฟ้า                        |
| P | = | กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt) |
| t | = | เวลา มีหน่วยเป็น ชม. (h)            |

## 2.7 การออกแบบการทดลอง

(ปารเมศ ชุตินา, 2545) กล่าวว่า การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะทำการตรวจสอบ การออกแบบการทดลองเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนที่น้อยลงที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัย k ชนิดได้อย่างสมบูรณ์โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้นการ



ออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  จึงถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อให้เหลือน้อยที่สุด แต่เนื่องจากแต่ละปัจจัยในการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  ประกอบด้วย 2 ระดับ เราขอสมมติว่าผลตอบสนองที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมุติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อการกรองปัจจัยในเบื้องต้น

#### ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

(Montgomery, 2009) กล่าวถึงแนวทางในการออกแบบการทดลอง โดยการใช้วิธีเชิงสถิติ เพื่อออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) การกำหนดปัญหา (Identify problem) เป็นการระบุปัญหาที่ต้องการแก้ไขหรือปรับปรุง เพื่อกำหนดเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของการทดลองให้ชัดเจน

2) การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of factors, levels and ranges) เป็นการพิจารณาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของการทดลอง เพื่อหาความสำคัญของปัจจัย

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the response variable) เป็นการพิจารณาตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการวัดผล ซึ่งตัวแปรต้องสามารถให้ข้อมูลและวัดค่าได้

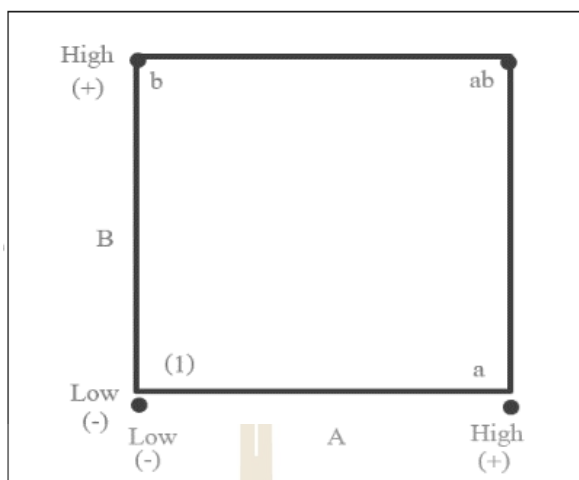
4) การเลือกการออกแบบการทดลอง (Select design) เป็นการพิจารณาวิธีการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมและได้ผลตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง การออกแบบการทดลองที่นิยมใช้คือการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

5) การดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ติดตามผลการดำเนินการทดลอง ควบคุมให้เป็นไปตามแผนการดำเนินงาน

6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical analysis of data) เป็นการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติว่าปัจจัยใดส่งผลต่อผลตอบสนองตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

7) สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ (Conclusions and recommendations)

การออกแบบการทดลองยังสามารถเห็นปัจจัยที่ส่งผลร่วมกัน เมื่อมีทรีทเมนต์หรือปัจจัยที่มีตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปมารวมกันจะเรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment combination) ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ  $2^2$  แฟกทอเรียล คือการทดลองที่มี 2 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ รวมเป็น 4 ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน ทรีทเมนต์คอมบิเนชันของแผนการทดลองแบบ  $2^2$  แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ทริทเมนต์คอมบินเนชันของแผนการทดลองแบบ  $2^2$  แฟกทอเรียล

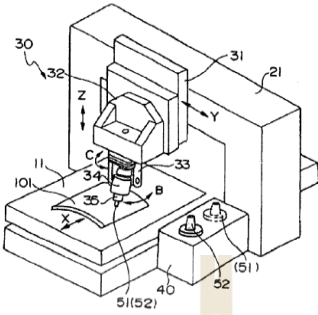
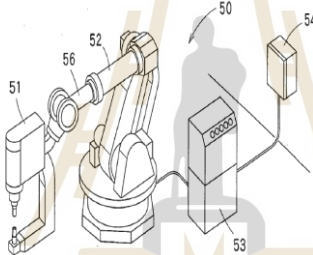
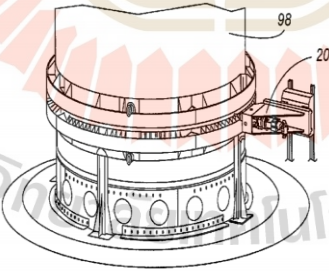
## 2.8 สิทธิบัตรงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสิทธิบัตรที่เกิดขึ้นจากการสร้างเครื่องมือเครื่องจักรในกระบวนการเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวน เพื่อเป็นแนวทางสำหรับงานวิจัย รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สิทธิบัตรงานวิจัย

| ผู้ประดิษฐ์                        | สิทธิบัตรงานวิจัย | รายละเอียดการประดิษฐ์                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Jack Mansfield<br>Thompson, 2006) |                   | <p>เครื่องเชื่อมเสียดทานประกอบด้วยโต๊ะสำหรับรองรับชิ้นงาน เครื่องมือในการเชื่อมเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X ชุดเชื่อม (หัวกวน) ติดอยู่ด้านบน มีลูกกลิ้งคู่หนึ่งติดตั้งฉากกับแกนหมุนของเครื่องมือ ลูกกลิ้งสัมผัสพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้การเชื่อมอยู่ในระดับความลึกที่ต้องการ</p> |

ตารางที่ 2.4 ลิขสิทธิ์งานวิจัย (ต่อ)

| ผู้ประดิษฐ์             | ลิขสิทธิ์งานวิจัย                                                                   | รายละเอียดการประดิษฐ์                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Fumio Yoshinaga, 2004) |    | <p>เครื่องจักรมีพิคัดแกน 5 แกนระบบสามารถควบคุมได้พร้อมกันสามแกนเป็นแกนเคลื่อนที่เชิงเส้น และสองแกนคือแกนหมุน การเชื่อมเสียดทานสามารถควบคุมความลึกของเครื่องมือได้ โดยการรักษาแรงบิดอุปกรณ์สามารถลดต้นทุน และพื้นที่การติดตั้งในโรงงาน</p>                                     |
| (Kazumi Fukuhara, 2006) |   | <p>เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขับเคลื่อนการหมุนลักษณะเป็นชุดแขนกลในระบบ 5 แกน ชุดหัวเชื่อมติดตั้งที่ปลายแขนมีชิ้นส่วนวัสดุสามารถปรับให้ถอดออกได้ ชุดหัวกวนติดตั้งที่ส่วนหน้าของแขนกล</p>                                                                                      |
| (David M. Potter, 2011) |  | <p>เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีระบบการทำงานในการเชื่อมเสียดทาน โดยใช้การเคลื่อนที่เป็นเส้นรอบวง เครื่องเชื่อมเสียดทานประกอบด้วยชุดหัวเชื่อม ชุดหัวกวนมีขนาดเล็กติดตั้งบนชิ้นงานขนาดใหญ่ และชุดหัวกวนทำการหมุนรอบชิ้นงาน ประโยชน์ของชุดเครื่องมือเป็นเครื่องจักรขนาดเล็ก</p> |

## 2.9 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีดังนี้ ความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือกวน ความเร็วการเดินของเครื่องมือกวนในกระบวนการเชื่อม เครื่องมือกวน ขนาดพินกวนและลักษณะรูปทรงของเครื่องมือกวน ตัวแปรด้านมุมเอียงของเครื่องมือกวน และตัวแปรด้านวัสดุของสำหรับการทดลอง ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพของผิวรอยเชื่อม แรงกระทำตามแนวแกนที่ใช้ในการเชื่อม และสมบัติทางกลของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังนี้

### 1) ตัวแปรความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน

จากการศึกษาของ (H. Su, 2013) พบว่าความเร็วหมุนมีผลต่อแรงในแนวแกน Z และแนวแกน X ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เมื่อความเร็วหมุนของเครื่องมือสูงจะทำให้เกิดความร้อนสูง การประสานของเนื้อวัสดุไม่เกิดการตกตะกอนทำให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุเปลี่ยนไป (A. Abdollahzadeh, 2019) พบว่าความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน ส่งผลต่อสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (Kuntala Goutham Krishna, 2017) พบว่าความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน ที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที หรือความเร็วรอบที่เหมาะสม สมบัติทางกลของชิ้นงานอะลูมิเนียม 2024 ค่าความต้านทานแรงดึงดีที่สุด (D. Trimble, 2015) พบว่าความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวน 450 รอบต่อนาที ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 T3 ให้การเสียรูปพลาสติกที่เหมาะสม และความร้อนเสียดทานในการเชื่อมสูง ทำให้วัสดุมีค่าความต้านทานแรงดึงสูง (สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, 2558) พบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมต่อชนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อถึงของแข็งเกรด 356 กับ 7075 คือความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที แนวเชื่อมมีการประสานกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดที่ดี มีการเกิดครีบกั้นที่บริเวณขอบของแนวเชื่อม เกรนของวัสดุมีขนาดเล็กลงและมีความละเอียดเพิ่มขึ้น

### 2) ตัวแปรความเร็วเดินเชื่อมของเครื่องมือกวน

จากการศึกษางานวิจัยของ (H. Su, 2013) ทำการศึกษาความเร็วเดินเชื่อม 40, 80 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที มีผลต่อแรงกระทำและแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะเชื่อม โดยพบว่าความเร็วเดินเชื่อมช้าทำให้เกิดความร้อนสะสมในชิ้นงาน และเกิดแรงกระทำในการเชื่อมน้อยกว่าตัวแปรความเร็วเดินเชื่อมสูง (D. Trimble, 2015) พบว่าความเร็วเดินเชื่อมของเครื่องมือกวน 125, 180, 250, 355 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที มีผลต่อคุณภาพผิวงานเชื่อมและค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ ความเร็วเดินเชื่อมของเครื่องมือเชื่อม 180 มิลลิเมตรต่อนาที มีผลต่อคุณภาพผิวงานเชื่อมที่ดี และให้

ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุที่ดีที่สุด

### 3) ตัวแปรขนาดของพินกวน และปากกวนของเครื่องมือกวน

จากการศึกษางานวิจัยของ (H. Su, 2013) พบว่าขนาดของพินกวนของเครื่องมือกวน 2.5 มิลลิเมตร และปากของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร มีผลต่อแรงที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทาน เมื่อขนาดของพินกวนใหญ่ต้องใช้แรงกด และแรงบิดในการกวนชิ้นงานเพิ่มขึ้น (D. Trimble, 2015) ทำการศึกษาลักษณะของพินกวนแบบเกลียวสามเหลี่ยม รูปทรงแบบสี่เหลี่ยม และแบบทรงกลม พบว่าลักษณะของพินกวนแบบเกลียวสามเหลี่ยม เกิดแรงในแนวแกน Z ขณะเชื่อมน้อยที่สุด และให้ค่าความต้านทานแรงดึงในวัสดุสูงกว่ารูปทรงแบบสี่เหลี่ยม และแบบทรงกลม จากการศึกษางานวิจัยของ (วรพงศ์ บุญช่วยแทน, 2562) พบว่าการเพิ่มความเร็วหมุนของเครื่องมือกวนมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าลดน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความร้อน และการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก จากการทดลองชิ้นงานที่มีความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 215.52 MPa โดยใช้ความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน 1,750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 มิลลิเมตรต่อ นาที (Kuntala Goutham Krishna, 2017) ทำการทดสอบเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 และ 7075 พบว่าเครื่องมือรูปทรงเกลียวประสานวัสดุได้ดี ให้ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุสูงกว่ารูปทรงกรวย และรูปทรงสี่เหลี่ยม

### 4) ตัวแปรด้านมุมเอียงของเครื่องมือกวน

(Majid Elyasi, 2016) พบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของเครื่องมือกวน แรงกระทำตามแนวแกนเพิ่มขึ้น มุมเอียงเครื่องมือที่เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อโลหะเกิดการผสมกันมากขึ้น และผลการเอียงเครื่องมือต่อโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าอะลูมิเนียม 1100 ได้รับผลกระทบทางความร้อนมากกว่า A441 AISI ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 75% ของโลหะอะลูมิเนียมเดิม มุมเอียง 2 องศา และ 3 องศา ทำให้เกิดการกดอัดในเนื้อวัสดุส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น (วิชัย พุ่มจันทร์, 2556) กล่าวว่า การเอียงเครื่องมือในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีผลกระทบกับผิวหน้าแนวเชื่อม เมื่อเอียงองศาเพิ่มขึ้นทำให้เกิดครีบและผิวลักษณะเป็นชั้นน้อยลง การเอียงเครื่องมือมีตั้งแต่ 0 - 4 องศา และการเอียงเครื่องมือไม่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึงของอะลูมิเนียม 6063 และอะลูมิเนียม 7075

(A. Arora, 2011) ออกแบบเครื่องมือกวนในการเชื่อมอะลูมิเนียม 6061 และนำเสนอการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือกวน ที่อ้างอิงการเกิดแรงบิดในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เส้นผ่านศูนย์กลางปากของเครื่องมือกวนที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้ โดยใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลข และการเชื่อมที่ขนาดปากของเครื่องมือกวนใหญ่เกินความเหมาะสมทำให้มีความร้อนสูง การไหลของวัสดุจึงทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางบ่าของเครื่องมือกวนที่ใหญ่เกินไปทำให้เครื่องมือกวนสูญเสียการเกาะวัสดุ วัสดุจะลดความต้านทานต่อการไหล และพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางบ่าของเครื่องมือกวนที่เหมาะสมที่สุดคือ 18 มิลลิเมตร โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน 1,200 รอบต่อนาที ส่งผลให้มีคุณสมบัติการรับแรงดึงดี ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและเป็นผลให้เครื่องมือหมุนไม่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนไหวของวัสดุ

(D. Trimble, 2015) ศึกษาารูปทรงของเครื่องมือเชื่อม ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน ในการเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม 2024-T3 การทดลองใช้ชิ้นงานขนาด 360 X 80 X 4.8 มิลลิเมตร ใช้เครื่องมือเชื่อมพินกวนที่มีลักษณะเกลียวสามแฉก, สีเหลือง และทรงกรวย ขนาดพินกวน 6 มิลลิเมตร ขนาดบ่ากวน 18 มิลลิเมตร ความเร็วเดินเชื่อม 125, 180, 250, 355 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วหมุนของเครื่องมือ 280, 355, 450, 560, 710 และ 900 รอบต่อนาที พบว่าพินกวนที่มีลักษณะเกลียวสามแฉก มีประสิทธิภาพดีที่สุด ความเร็วหมุนของเครื่องมือ 450 รอบต่อนาที ให้การเสียดทานแบบพลาสติกที่เหมาะสม และให้ความร้อนเสียดทานในการเชื่อมสูง การเชื่อมที่ความเร็วรอบการหมุนต่ำส่งผลให้การเปลี่ยนรูปวัสดุไม่เพียงพอขณะที่การเชื่อมที่หมุนด้วยความเร็วที่สูงส่งผลให้เกิดความร้อนมากเกินไป ความเร็วในการเดินเชื่อมสูง 355 มิลลิเมตรต่อนาที มีประสิทธิภาพรอยเชื่อมสูงให้ความต้านทานแรงดึง 93.9% จากวัสดุเดิม และไม่มีข้อบกพร่องภายในพื้นผิวงานเชื่อม

(Majid Elyasi, 2016) ทำการศึกษามุมเอียงของเครื่องมือกวนในระดับ 1, 2 และ 3 องศา ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนบนอะลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้า พารามิเตอร์ในกระบวนการมีความเร็วในการหมุนของเครื่องมือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของเครื่องมือ แรงกระทำในแนวแกนเพิ่มขึ้น มุมเอียงเครื่องมือที่เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อโลหะเกิดการผสมกันมากขึ้น และการเอียงเครื่องมือมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางจุลภาค วัสดุ 1100 ได้รับผลกระทบทางความร้อนมากกว่า AISI 441 ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของจุดต่อคือ 75% ของวัสดุเดิม โดยใช้มุมเอียง 2 องศา ความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมเอียง 3 องศา คือ 71 MPa และ 75% JE (ประสิทธิภาพการต่อวัสดุ) จากวัสดุเดิม

(วิชัย พุ่มจันทร์, 2556) ศึกษาการมุมเอียงของเครื่องมือในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทดสอบเชื่อมอะลูมิเนียมแผ่นรีดต่างชนิดคือ 6063 และ 7075 โดยศึกษา ตัวแปรการเอียงเครื่องมือกวน 0, 2 และ 4 องศา ความเร็วเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที พบว่าการเอียงเครื่องมือส่งผลต่อผิวแนวเชื่อมเท่านั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง เมื่อมีการเอียงองศาเพิ่มขึ้นทำให้เกิดครีบก และผิวลักษณะเป็นชั้นน้อยลง ที่ด้านอะลูมิเนียม 6063 มีความสมบูรณ์มากกว่าซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ



อะลูมิเนียม 7075 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม

(H. Su, 2013) ทำการศึกษาแรงที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยทำการวัดแรงแบบทางอ้อมโดยแปลงกระแสไฟฟ้า และทำการวัดแรงบิดของมอเตอร์ในขณะที่ทำการเชื่อม ใช้วัสดุอะลูมิเนียม 2024-T4 ความเร็วการหมุนเครื่องมือ และความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน เครื่องมือเชื่อมมีลักษณะแบบทรงกรวยเกลียว มุมในการเอียงเครื่องมือ 2.5 องศา ผลการทดลองแรงบิดเอาต์พุตของมอเตอร์ในระหว่างกระบวนการเชื่อมแรงมอเตอร์แกน Z จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มเชื่อม และลดลงเมื่อปาเครื่องมือถูกสัมผัสลงในชิ้นงาน แรงบิดต่ำสุดของมอเตอร์เครื่องมือคือ 10 Nm. ที่ความเร็วการหมุน 1,000 รอบต่อนาที แรงบิดเอาต์พุตของเซอร์โวมอเตอร์แกน X นั้นสอดคล้องกับความเร็วในการหมุนของเครื่องมือที่ 800 รอบต่อนาที และการเคลื่อนที่ 40 มม.ต่อนาที เกิดแรงบิดของมอเตอร์น้อยที่สุด ลักษณะสัณฐานวิทยาที่ดีที่สุดในการเชื่อมคือ ความเร็วเดินเชื่อม 40 มม.ต่อนาที และความเร็วการหมุน 1,000 รอบต่อนาที การเชื่อมที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วการเดินเชื่อมต่ำและความเร็วในการหมุนสูง

(A. Abdollahzadeh, 2019) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการ กระบวนการเชื่อมแบบเสียดทานระหว่างอะลูมิเนียม 6061 และแมกนีเซียม AZ31 ความเร็วในการเคลื่อนเดินเชื่อม 25 และ 35 มม.ต่อนาที และความเร็วในการหมุน 550, 600 และ 650 รอบต่อนาที ใช้ขนาดพินกวน 4 มิลลิเมตร ขนาดปากกวน 15 มิลลิเมตร ความยาวของพินกวน 4.8 มิลลิเมตร ผลการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ และการความเร็วหมุนที่เหมาะสมที่สุดคือ 35 มม.ต่อนาที และ 650 รอบต่อนาที ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของโซนกวนของที่มีอนุภาคนาโนเซรามิก ที่มีความแข็งแรงสูง มีการแตกร้าวตามโครงสร้างด้านข้างแนวเชื่อม การแตกหักของตัวอย่างเป็นการแตกหักแบบเหนียวและเป็นรูปซิกแซก วัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจากการลดขนาดของเกรนที่อยู่ติดกันกับ Mg. alloy ทำให้เกิดการโค้งตัวและทำให้เกิดการแตกหักยาก

(Kuntala Goutham Krishna, 2017) ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ของอะลูมิเนียมต่างชนิดกันระหว่าง 2024 และ 7075 หนา 6 มิลลิเมตร การทดลองใช้พินกวนขนาด 8 มิลลิเมตร ความยาวของพินกวน 4.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากกวน 24 มิลลิเมตร แรงตามแนวแกนคงที่ 5 KN รูปทรงของเครื่องมือเชื่อมแบบเกลียวเรียวสี่เหลี่ยม และกรวยเรียว ความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือที่ 900, 1120 และ 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 60, 31.5 และ 40 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ Cryogenic เพื่อระบายความร้อนบนงานด้านหลังเครื่องมือ การทดลองพบว่าความเร็วการหมุน 1400 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที การต่อวัสดุดีไม่มีจุดบกพร่องในผิวชิ้นงาน และความเร็วในการหมุน



เครื่องมือ 900 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 31.5 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 318.449 MPa

(Vanama Santosh, 2017) ทำการออกแบบสร้างเครื่องมือสำหรับการเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวนสำหรับแขนกล ใช้หุ่นยนต์ ABB IRB1410 วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 6082 พินกวนของเครื่องมือเชื่อมมีขนาด 4 มิลลิเมตร บ่ากวนของเครื่องมือเชื่อม มีขนาด 15 มิลลิเมตร หัวจับเครื่องมือเชื่อมออกแบบโดยใช้หัวระบบนิวเมตริก ให้ความเร็วรอบ 22,000 รอบต่อนาที และให้แรงบิด 2.1 Nm. ประกอบบนแขนหุ่นยนต์ ABB IRB1410 ผลการทดลองแรงที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือเชื่อม 3 kg/cm และแรงดันลมที่เกิดขึ้นในชุดหัวนิวเมตริกคือ 3 - 5 bar ผลการทดลองแนวเชื่อมไม่สามารถประสานวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน

(รพงค์ บุญช่วยแทน, 2562) ทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 ความหนา 4 มิลลิเมตร และอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 7075 ความหนา 6 มิลลิเมตร โดยศึกษาความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน 1,320 - 2,200 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 80 - 160 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็วหมุนของเครื่องมือกวนมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าลดน้อยลง และเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมให้เร็วขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าลดน้อยลง โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวกวนเกรนโลหะถูกทำให้ละเอียดจากการเพิ่มขึ้นของความร้อน และการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก จากการทดลองชิ้นงานที่มีความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 215.52 MPa โดยใช้ความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน 1,750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 มิลลิเมตรต่อนาที ความแข็งแรงสูงสุดบริเวณแนวกวน คือ 135.0 HV0.1 ที่ความเร็วหมุน 1,320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที

(รพงค บุญช่วยแทน, 2560) ศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ใช้อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดกันระหว่างอะลูมิเนียม 2024 และ 6061 ปัจจัยการเชื่อมมีความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วกด ใช้ความลึกในการเชื่อม 0.5 มิลลิเมตร เวลาที่เครื่องมือหมุนแช่ในเนื้อวัสดุ 10 วินาที เครื่องมือเชื่อมมีลักษณะทรงกระบอก การทดลองใช้เครื่องกัดแนวตั้ง Bridgeport ขนาดของชิ้นงาน อะลูมิเนียม 2024 มีขนาด 100 X 15 X 2 มิลลิเมตร และอะลูมิเนียม 6061 มีขนาด 100 X 15 X 4 มิลลิเมตร ระยะการซ้อนทับกันที่ 20 มิลลิเมตร ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบ ความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้นความร้อนจากการเสียดทานและการไหลวนของเนื้อโลหะจะมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ลักษณะเกรนในบริเวณที่กวนมีความละเอียดขึ้น บริเวณรอบหัวพินกวนมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบ ๆ บริเวณแนวเชื่อม ทำให้ค่าความแข็งของวัสดุทั้งสองเพิ่มขึ้นบริเวณรอบหัวพินกวน การตกตะกอนของเกรน Cu ทำให้ค่าความแข็งสูงสุดของ อะลูมิเนียม 2024 บริเวณ

SsZ มีค่า 130.7 Hv. และอะลูมิเนียม 6061 บริเวณ SpZ มีค่า 111.5 Hv. ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงลดลง เมื่อความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น เนื่องจากอัตราการกระจายตัวของความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุอ่อนนุ่มลง

(สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, 2558) ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 356 กับ 7075 ชิ้นงานทดสอบมีความหนา 4 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และกว้าง 50 มิลลิเมตร กำหนดให้อะลูมิเนียม 356 อยู่ด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating Side; RS) และ อะลูมิเนียม 7075 อยู่ด้านแอดวานซ์ซิงไซด์ (Advancing Side; AS) ใช้ปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม 710, 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80, 112 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้เครื่องกัดแนวตั้งในการทดลอง ปัจจัยที่ควบคุมคือเอียงเครื่องมือกวน 3 องศา ขนาดพินกวน 3.2 อะลูมิเนียม ยาว 5 อะลูมิเนียม และขนาดของบ่ากวน 20 อะลูมิเนียม บ่าของเครื่องมือกวนสัมผัสกับผิวชิ้นงานจะหมุนอยู่กับที่ 45 วินาที ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที แนวเชื่อมมีการผสมกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิด เกรนจะมีขนาดเล็กลงและมีความละเอียดเพิ่มขึ้น ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมมีผลการกวนเนื้อ โลหะ ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อ นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 213 MPa

(Mouloud Aissani, 2010) ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้อะลูมิเนียม 2024-T4 และ 7075-T6 การทดลองทำการออกแบบหัวจับเครื่องมือสำหรับการเชื่อมมีสปริงเพื่อลดแรง ลักษณะของรูปทรงของเครื่องมือที่ใช้เชื่อมมีรูปทรงแบบ Conical threaded ทำจากวัสดุ 42CD4 Steel ทดลองโดยใช้เครื่องกัดกำลังไฟฟ้า 5 KW ความเร็วหมุนเครื่องมือเชื่อม 1,400 และ 2,000 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 16 มิลลิเมตร.ต่อนาที ผลการทดลองเชื่อม 2024-T4 และ 7075-T6 ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เกิดความร้อนที่สูงทำให้ผิวงานเชื่อม โครงสร้างเกรนของวัสดุเปลี่ยน และความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการตกผลึก เกิดเกรนของวัสดุแตกต่างกัน 2024-T4 ค่าความแข็งต่ำสุดคือ 111 HV และ 118 HV สำหรับ 7075-T6 เกิดการอ่อนตัวของวัสดุในจุดต่อเมื่อเทียบกับวัสดุเดิม เนื่องจากผลกระทบความร้อนของกระบวนการเชื่อม

(B.T. Gibson, 2011) ทำการศึกษาแรงตามแนวแกนในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้ Strain gages และจำลองสถานการณ์การโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดำเนินการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนในเครื่องกัดแนวนอน โดยเครื่องจักรควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ และติดตั้งเกจวัดความเครียดรุ่น C2A-06-250LW-350 ในวัดค่าการดัดงอ แรงส่งไปด้านหลังสปริงเดิมเมื่อเครื่องเกิดแรงกระทำจากการเชื่อม การทดลองใช้อะลูมิเนียม 6061 หนา 0.25 นิ้ว พารามิเตอร์

การเชื่อมคือความเร็วหมุนของเครื่องมือ 1,400 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 6 นิ้วต่อนาที ความลึก 0.004 นิ้ว มุมเอียงของเครื่องมือ 1 องศา และทำการตรวจสอบเทียบการวัดแรงโดยโพลดเซลล์ ข้อมูลการสอบเทียบตรงกับการทดลอง แรงสูงสุดที่เกิดจากการทดลอง 5,000 นิวตัน

(Amber Shrivastava, 2015) ทำการศึกษาการใช้พลังงานระหว่างการกวนแรงเสียดทานการเชื่อม (FSW) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยแก๊ส (GMAW) ในอะลูมิเนียม 6061-T6 การวัดพลังงานรวมทั้งก่อนและหลังกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับแปรรูปชิ้นงาน ความหนาของชิ้นงานสำหรับทั้งสองกระบวนการ (หนา 5 มม. สำหรับ FSW และหนา 7.1 มม. สำหรับ GMAW) การทดสอบแรงดึงนั้นคล้ายคลึงกัน การประเมินวงจรชีวิต (LCA) ถูกใช้เพื่อกำหนดและเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของ FSW และ GMAW สำหรับงานเชื่อมพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาโดย FSW ใช้พลังงานน้อยลง 42% เมื่อเทียบกับ GMAW และใช้วัสดุน้อยลงประมาณ 10% สำหรับการทดลองที่ให้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน และนำไปสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับ FSW น้อยลงประมาณ 31% เมื่อเทียบกับ GMAW ทั้งสอง การใช้พลังงานที่ลดลงในช่วง FSW และกระบวนการก่อนและหลังที่เกี่ยวข้องมีส่วนร่วมในการลดพลังงานโดยรวม

(Huijie Liu, 2012) ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโลหะอะลูมิเนียม 2219-T6 พบว่าในพื้นที่กวน (WNZ) ของข้อต่อทั้งหมด เกรนโลหะตรงกลางส่วนมีขนาดใหญ่กว่าส่วนบนและส่วนล่าง ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกวน หรือความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นพบข้อบกพร่องในแนวเชื่อม ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกวนที่คงที่ หรือเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่าแรงดึงเพิ่มขึ้นสูงสุดจากตัวแปรที่เหมาะสม จากนั้นค่าความต้านทานแรงดึงลดลงจากการเกิดข้อบกพร่องในการเชื่อม ความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือ 340 MPa เท่ากับ 79% จากการเปรียบเทียบของวัสดุเดิม การเกิดข้อบกพร่องพบว่าความเร็วในการหมุนมีผลมากกว่าความเร็วในการเดินเชื่อม สำหรับความเร็วในการหมุนที่ต่ำ ข้อต่อจะหักในพื้นที่กวน (WNZ) ในขณะที่ความเร็วในการหมุนสูงมีแนวโน้มที่จะแตกหัก อยู่ติดกับโซน (TMAZ) บนด้าน (RS) แทนที่จะเป็นด้าน (AS)

(William R. Longhurst, 2016) ทำการออกแบบพัฒนาเครื่อง FSW โดยใช้เครื่องมือในการเชื่อมเสียดทานแบบปรับและจัดแนวด้วยตนเองเมื่อมีแรงกระทำเรียกว่า (SAA-FSW) เครื่องมือ SAA-FSW เป็นเครื่องมือรูปแบบกระสวย ลอยได้อย่างอิสระโดยไม่มีตัวกระตุ้นภายนอกใด ๆ สำหรับการทดลองใช้ความเร็วหมุนเครื่องกวน 1,400, 1700 และ 2,000 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 228.6 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าเครื่องมือ SAA-FSW สามารถเชื่อมอะลูมิเนียม 1100 หนา 1/8 นิ้ว จากการทดลองเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้นแรงบิดนั้นลดลง แรง

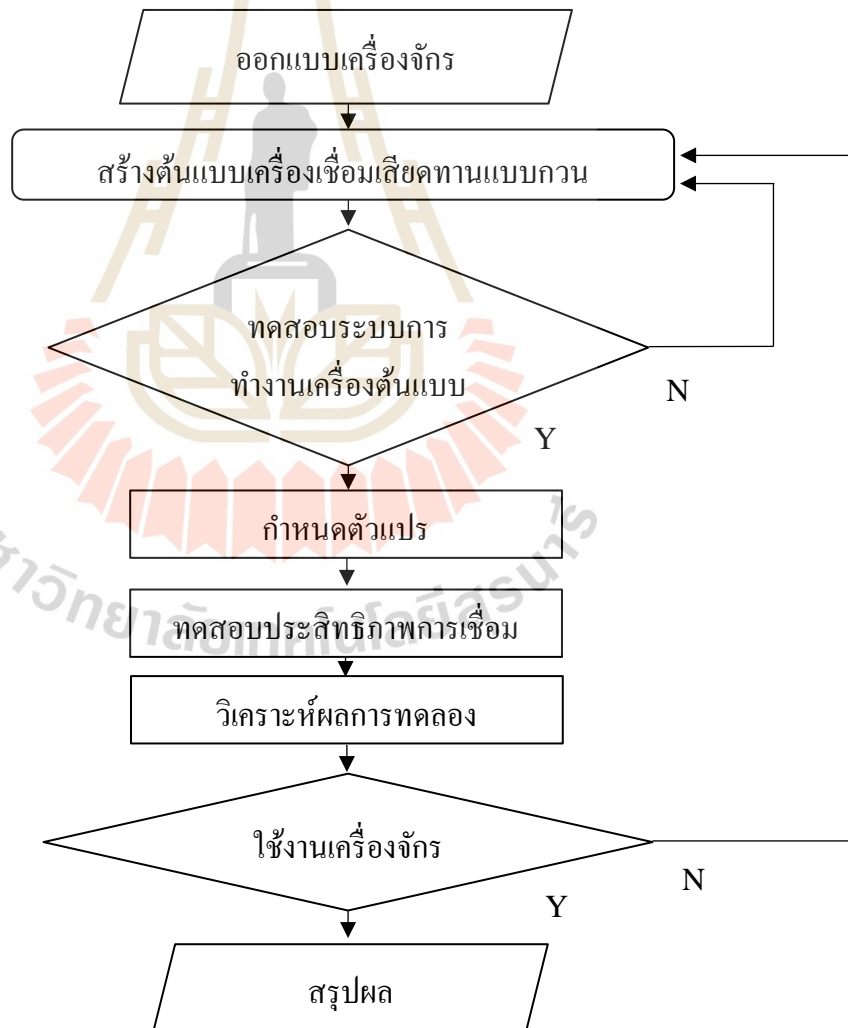
ตามแนวแกนที่เกิดขึ้น คือพบแรงระหว่างการใช้เครื่องมือ แต่แรงกระทำลดหายไปอย่างรวดเร็วเมื่อเครื่องมือทำงานเต็มที่แล้ว แรงตามแนวแกนน้อยกว่า 200 N ในระหว่างการเชื่อมเครื่องมือสามารถปรับตำแหน่งให้สอดคล้องกับผิวชิ้นงานอัตโนมัติ โดยเคลื่อนที่แบบลอยตัวฟรีทำให้เครื่องมือสามารถปรับตำแหน่งเอง และจัดแนวกับชิ้นงานได้จึงไม่จำเป็นต้องใช้กลไกการกระตุ้นใด ๆ ทำให้กำลังการเชื่อมต่ำเมื่อเทียบกับ FSW ทั่วไป และทำการวัดแรงโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงแม่เหล็กโดยการเจาะรูในชิ้นงานลึก 1/16 นิ้ว ให้สัมผัสกับพื้นผิวของเซ็นเซอร์ความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องในการเชื่อมระหว่างกระบวนการขึ้นมาก

(Gianluca Buffa, 2018) วิเคราะห์ความต้องการพลังงานไฟฟ้า ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในกระบวนการ วัสดุ และสถาปัตยกรรมเครื่องจักร พบว่าการใช้เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบเฉพาะ มีความต้องการพลังงานที่มากที่สุดระหว่างการเชื่อมคือชุดไฮดรอลิกที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเครื่องมือกวน มีสัดส่วนมากกว่า 80% ของความต้องการพลังงานทั้งหมดและอัตราเร็วการเคลื่อนที่ เครื่องมือกวนมีผลกระทบต่อการใช้พลังงาน โดยการวิเคราะห์ SEC ดังนั้นด้วยการหมุนเครื่องมือกวนคงที่ และให้การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวนแตกต่างกัน ส่งผลให้ความต้องการพลังงานลดลงพลังงานที่จำเป็นในการเชื่อมวัสดุขึ้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ช่วงอุณหภูมิที่กระบวนการเกิดการใช้พลังงานแบ่งออกเป็นช่วงกำลังงานเชื่อมรวมระหว่าง 35 และ 50% และทางเลือกที่เหมาะสมของทั้งพารามิเตอร์ของเครื่องจักรและกระบวนการมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการ ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนบนเครื่องจักรเฉพาะประหยัดพลังงานสูงสุด 28% เมื่อเทียบกับการเชื่อมบนเครื่องกัดแบบแนวตั้ง

### บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็กต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วนั้น ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การออกแบบเครื่องจักรสำหรับการวิจัย เครื่องมือต่างๆในการวิจัยและการออกแบบการทดลอง โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

### 3.1 การออกแบบเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

#### 3.1.1 อภิปรายปัญหาของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับเครื่องเชื่อมแบบเสียดทาน ผู้วิจัยได้นำแนวคิดจากงานวิจัยกระบวนการเชื่อมเสียดทานและใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะต่าง ๆ เพื่อให้ได้เครื่องจักรต้นแบบที่สามารถทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ตามวัตถุประสงค์ โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ตารางที่ 3.1 รายงานผลการวิจัย ต่อแรงบิดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

| นักวิจัย                  | FACTOR                                  |                        |                                                              |                                              |                       |
|---------------------------|-----------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
|                           | ความเร็วรอบ<br>หมุนของ<br>เครื่องมือกวน | ความเร็ว<br>เดินเชื่อม | รูปทรงเครื่องมือ                                             | วัสดุ                                        | แรงบิดที่<br>เกิดขึ้น |
| (H. Su, 2013)             | 1,000<br>รอบต่อนาที                     | 40<br>มม.ต่อนาที       | ทรงกรวย<br>ขนาดบ่า 15 มม.<br>ขนาดพิน<br>2.5 มม.<br>ยาว 5 มม. | อะลูมิเนียม<br>2024 -T4                      | 22 Nm.                |
| (B.T. Gibson,<br>2011)    | 1,400<br>รอบต่อนาที                     | 6<br>นิ้วต่อนาที       | ทรงกระบอก                                                    | อะลูมิเนียม<br>6082<br>หนา 3 มม.             | 2.1 Nm.               |
| (Gianluca<br>Buffa, 2018) | 700<br>รอบต่อนาที                       | 200<br>มม.ต่อนาที      | ทรงกระบอก<br>ขนาด 4.5 มม.<br>ยาว 2.6 มม.                     | อะลูมิเนียม<br>6061 ความ<br>หนา 0.25<br>นิ้ว | 60 Nm.                |

จากตารางที่ 3.1 ปัญหาของแรงบิดที่เกิดขึ้นในการบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งได้ทำการทดลองบนเครื่องกัดตั้ง และเครื่องจักร CNC แต่การผลทดลองพบว่าแรงบิด และแรงกระทำตามแนวแกนในเครื่องจักรเกิดขึ้นสูง ในรายงานวิจัยของ (P. Shahi, 2014) ระบุว่าเครื่องจักรควรรับภาระงานจากแรงบิด และแรงกระทำได้ในช่วงที่ปลอดภัย ผู้วิจัยจึงนำปัญหานี้มาออกแบบต้นแบบเครื่องจักรสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังนี้

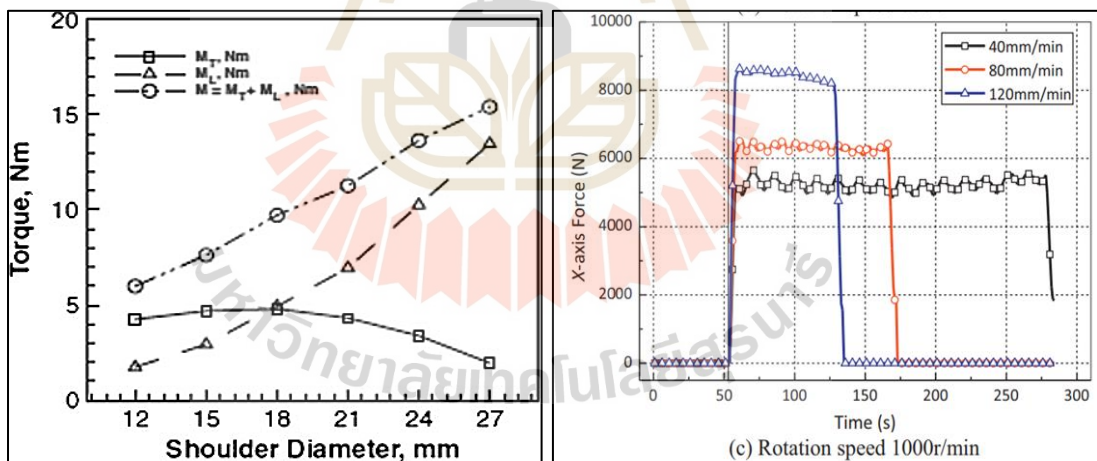


### 3.1.2 การออกแบบต้นแบบสำหรับการเชื่อมแบบเสียดทาน

จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น ชิ้นงานจะถูกยึดอยู่กับ โต๊ะรองรับชิ้นงานด้วยอุปกรณ์จับยึด มีการหมุนของเครื่องมือกวน และมีการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน หรือมีการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุละลายติดเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นเพื่อให้เครื่องจักรต้นแบบสามารถทำงานได้ จากทฤษฎีการออกแบบเครื่องจักรกลอัตโนมัติ ผู้วิจัยทำการออกแบบเครื่องจักรให้สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย โดยใช้ระบบกึ่งอัตโนมัติ เครื่องมือกวนถูกยึดให้อยู่กับที่ โต๊ะรองรับชิ้นงานเคลื่อนที่ในแนวแกน X วิธีการออกแบบเครื่องจักร แสดงดังนี้

#### 1) การออกแบบชุดสปินเดิล

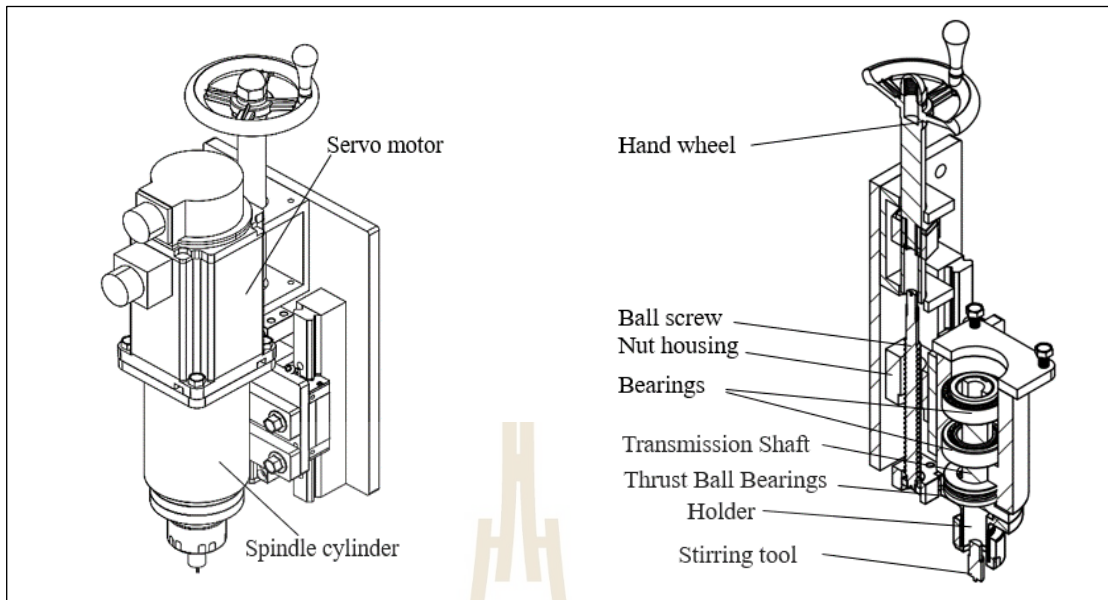
ผู้วิจัยทำการออกแบบโดยให้ความสำคัญกับเพลาส่งกำลังชุดสปินเดิล โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบเพลารับแรงกระทำตามแนวแกน และจากแรงบิดของเครื่องมือกวนตามทฤษฎีการออกแบบเพลาด้วยความเค้นเฉือนสูงสุด (วิรัช ธิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน, 2556) โดยอ้างอิงแรงบิดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยของ (A. Arora, 2011) และงานวิจัยของ (H. Su, 2013) แรงบิดที่เกิดขึ้นตามขนาดบ่าของเครื่องมือกวนและแรงตามแนวแกนแสดงดังรูปที่ 3.2



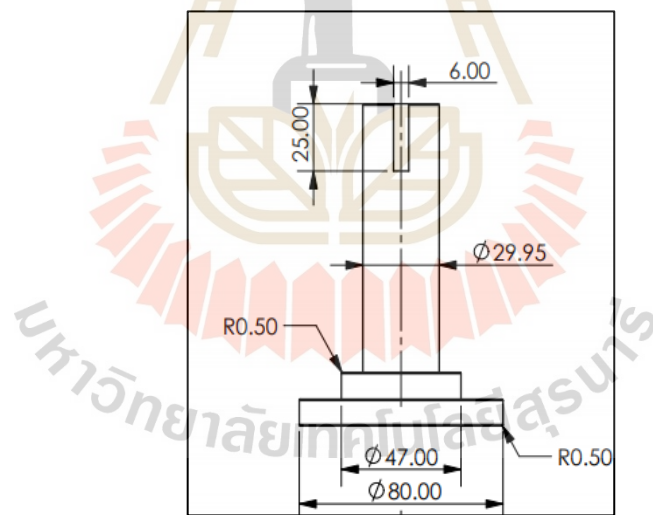
รูปที่ 3.2 แรงบิดที่เกิดขึ้นจากขนาดบ่าเครื่องมือกวน และแรงกระทำในแนวแกน X กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (A. Arora, 2011) และ (H. Su, 2013)

จากการสืบค้นงานวิจัยผู้วิจัยใช้บ่ากวนขนาด 15 มิลลิเมตร เพื่อเป็นจุดอ้างอิงแรงบิดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมและออกแบบเพลาส่งกำลังของชุดสปินเดิลแสดงดังรูปที่ 3.3 และคำนวณขนาดเพลาส่งกำลัง ตามทฤษฎีการออกแบบเพลาด้วยความเค้นเฉือนสูงสุดดังนี้





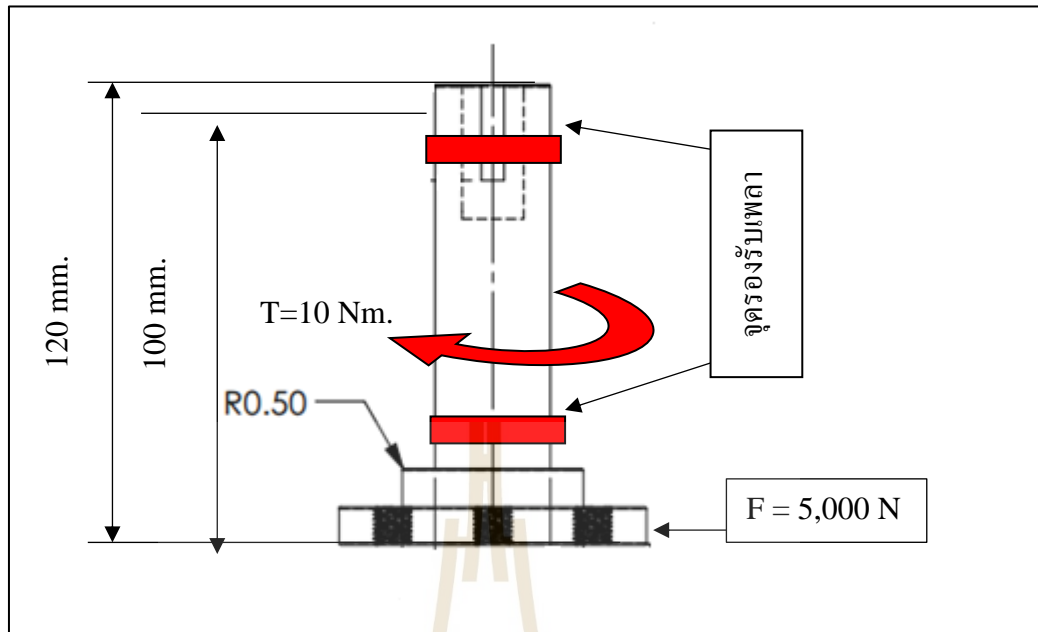
รูปที่ 3.3 ชุดสปีนเดิลของเครื่องจักร



รูปที่ 3.4 ขนาดและรูปร่างเพลาส่งกำลังชุดสปีนเดิล

## 2) การออกแบบเพลาส่งกำลัง

จากการออกแบบเพลาด้วยทฤษฎีความเค้นบิดสูงสุดในเพลาส่งกำลัง และคำนวณหาขนาดของเพลาส่งกำลังโดยใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด



รูปที่ 3.5 แรงบิดในเพลาส่งกำลัง ชุดสปินเดิล

โมเมนต์บิด  $T = 10$  นิวตันเมตร อ้างอิงจากงานวิจัยของ (A. Arora, 2011) สามารถหาขนาดของเพลาดูได้จากสมการที่ 2.2 แรงกระทำในแนวแกนอ้างอิงงานวิจัยของ  $F = 5,000$  นิวตัน

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau_p} \sqrt{(C_t T)^2 + (C_m M)^2}$$

แรงกระทำที่ปลายเพลานี้  $5,000$  นิวตัน ระยะความยาวของเพลานี้เพื่อหาโมเมนต์คัตที่ปลายเพลายาว  $120$  มิลลิเมตร ดังนั้นโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $M = (5,000 \text{ N} \times 120 \text{ mm.}) 600,000$  นิวตันมิลลิเมตร และความเค้นเฉือนครากหาได้จากสมการที่ 2.3

$$\tau_y = 0.6\sigma_y$$

$\sigma_y$  คือ ความเค้นแรงดึงที่จุดครากของวัสดุคือทำจากเหล็ก AISI 1020 รีดเย็น มีค่าเท่ากับ  $66 \text{ ksi}$ . หรือ  $455.05$  นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าความเค้นเฉือนใช้งาน ( $\tau_p$ ) เท่ากับ  $\frac{\tau_y}{N}$  โดย ค่าความปลอดภัย  $N$  เท่ากับ  $1.5$

$$\begin{aligned}\tau_p &= \frac{0.6 \times 455.05}{1.5} \\ &= 182.02 \text{ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร}\end{aligned}$$

สำหรับเพลามีร่องลึ้มเพื่อใช้ยึดให้ติดกับเพลาของเซอร์โวมอเตอร์ คิดค่าความปลอดภัยให้โดยความเค้นเฉือนใช้งาน โดยใช้งานเพียง 75 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น } \tau_p &= \frac{182.02 \times 75}{100} \\ &= 136.51 \text{ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร}\end{aligned}$$

ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด  $C_t$  หาได้จากตารางที่ 2.2 จากลักษณะของเพลามุมแรงสม่ำเสมอ หรือเพิ่มขึ้นช้า ๆ เลือกใช้ค่า  $C_t$  เท่ากับ 1.0

ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการตัด  $C_m$  หาได้จากตารางที่ 2.2 จากลักษณะของเพลามุมแรงสม่ำเสมอ หรือเพิ่มขึ้นช้า ๆ เลือกใช้ค่า  $C_m$  เท่ากับ 1.5 แทนค่าในสมการที่ 2.3

$$\begin{aligned}d^3 &= \frac{16}{\pi(136.51)} [(1.0 \times 10,000)^2 + (1.5 \times 600,000)^2]^{1/2} \\ d &= 30.15 \text{ มิลลิเมตร}\end{aligned}$$

ผู้วิจัยได้ใช้ขนาดเพลา 30 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดเพลามาตรฐาน และเหมาะสมกับการรับแรงของลูกปืน ที่นำมาใช้งาน

### 3) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลังจากมอเตอร์

เมื่อ  $P$  = กำลังของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นวัตต์  
 $N$  = ความเร็วรอบของเพลา 1,000 รอบต่อนาที  
 $T$  = โมเมนต์บิดหรือแรงบิดที่เกิดขึ้น = 10 Nm.

$$\text{จาก } P = \frac{2\pi 1000 \times 10}{60}$$

$$P = 1,047.2 \text{ วัตต์}$$

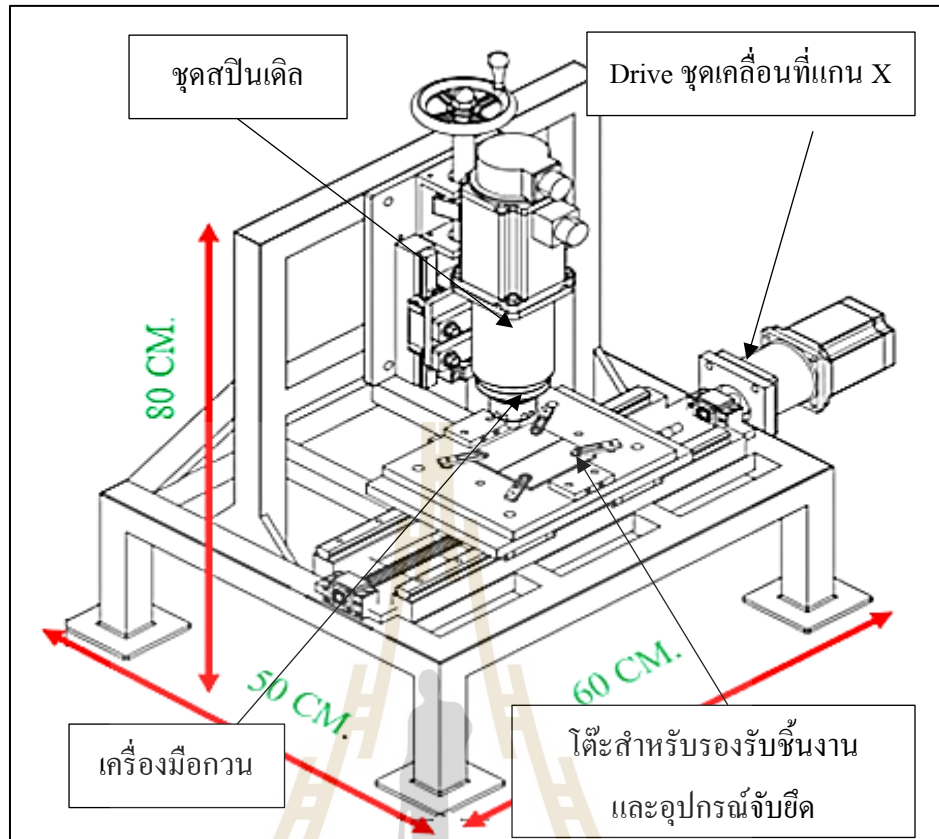
ดังนั้นมอเตอร์ชุดสปินเดิลใช้กำลังไฟฟ้าคิดเป็น 1.5 KW. AC. Servo motor 15 Nm. เป็นมอเตอร์ที่มีขายตามท้องตลาด

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการออกแบบเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

| ลำดับที่ | ตัวแปรในการออกแบบ              | ผลการคำนวณ             |
|----------|--------------------------------|------------------------|
| 1        | โมเมนต์บิด                     | 10,000 N mm.           |
| 2        | โมเมนต์ค้ำ                     | 600,000 N mm.          |
| 3        | ค่าความเค้นเฉือนใช้งาน         | 136.51 Nm <sup>2</sup> |
| 4        | กำลังที่ส่งจากมอเตอร์          | 1,047.2 W              |
| 5        | ขนาดของเพลาส่งกำลังชุดสปินเดิล | 30 มิลลิเมตร           |
| 6        | ความเร็วรอบหมุนเริ่มต้น        | 1,000 รอบต่อนาที       |
| 7        | ค่าความปลอดภัย                 | 1.5                    |

### 3.1.3 ลักษณะเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ส่วนประกอบของเครื่องจักรต้นแบบสำหรับทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนบนวัสดุอะลูมิเนียมผสม เครื่องจักรประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชิ้น โดยมีระบบการทำงาน คือ ชุดสปินเดิล มีความเร็วรอบในการหมุนสูงสุด 2,500 รอบต่อนาที สามารถเคลื่อนที่ขึ้น – ลง ในแนวแกน Z และ โต้ะรองรับชิ้นงานเคลื่อนที่ในแนวแกน X ความเร็วในการเคลื่อนที่สูงสุด 100 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนประกอบของเครื่องจักรแสดงดังรูปที่ 3.6

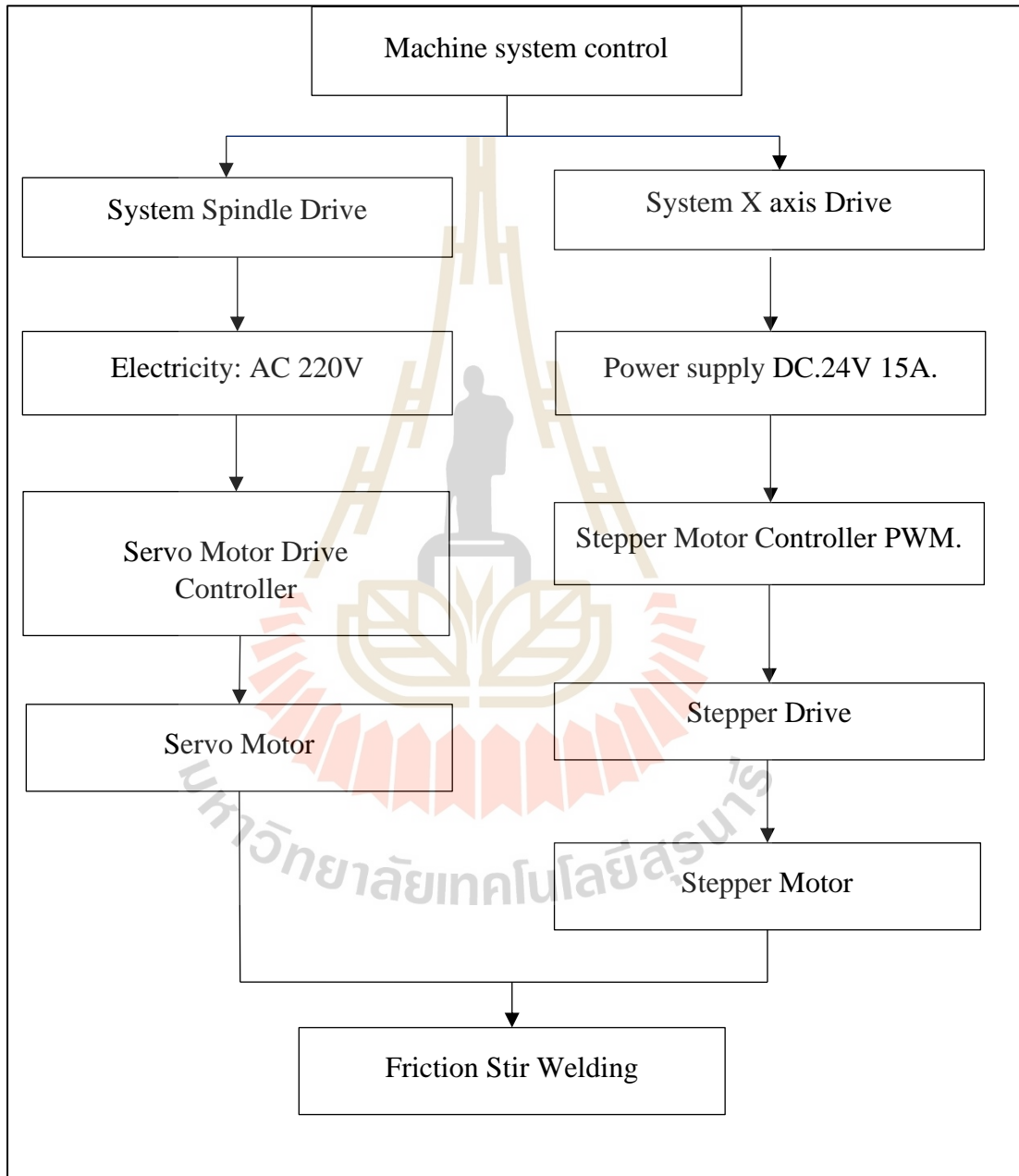


รูปที่ 3.6 แบบเครื่องเชื่อมเสียดทาน

- 1) โครงสร้างของเครื่องจักรทำจากเหล็กกล่อง มีความแข็งแรงสามารถรับแรงกระทำตามแนวแกน จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และเครื่องจักรมีขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร ขนาดความยาว 60 เซนติเมตร และสูง 80 เซนติเมตร
- 2) ชุดสปินเดิล สำหรับเครื่องจักรประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์ 15 N. m. 1.5 KW. AC เป็นต้นกำลัง และชุดสปินเดิล มีรูปทรงกระบอก มีระยะในการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z 50 มิลลิเมตร
- 3) ชุด Drive สำหรับขับเคลื่อนแกน X ประกอบด้วย สเต็ปป์มอเตอร์ แรงบิด 8 Nm. ขับเคลื่อนด้วยชุดบอลสกรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร บอลสกรูมีความยาว 250 มิลลิเมตร และรางเลื่อนแบบตลับลูกปืนหรือลิเนียร์ไกด์ (Linear Guide) มีขนาด 25 มิลลิเมตร เป็นชิ้นส่วนมาตรฐานของเครื่องจักรกล
- 4) โต๊ะสำหรับรองรับชิ้นงาน ใช้สำหรับวางชิ้นงาน หรือจับยึดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองมีขนาด 200 X 200 มิลลิเมตร

### 3.1.4 ระบบการทำงานของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การทำงานของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ผู้วิจัยออกแบบให้การสั่งงานเป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ สั่งงานชุดควบคุมมอเตอร์ให้เครื่องจักรทำงานเพื่อง่ายต่อการเชื่อมชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ระบบการควบคุมเครื่องจักร

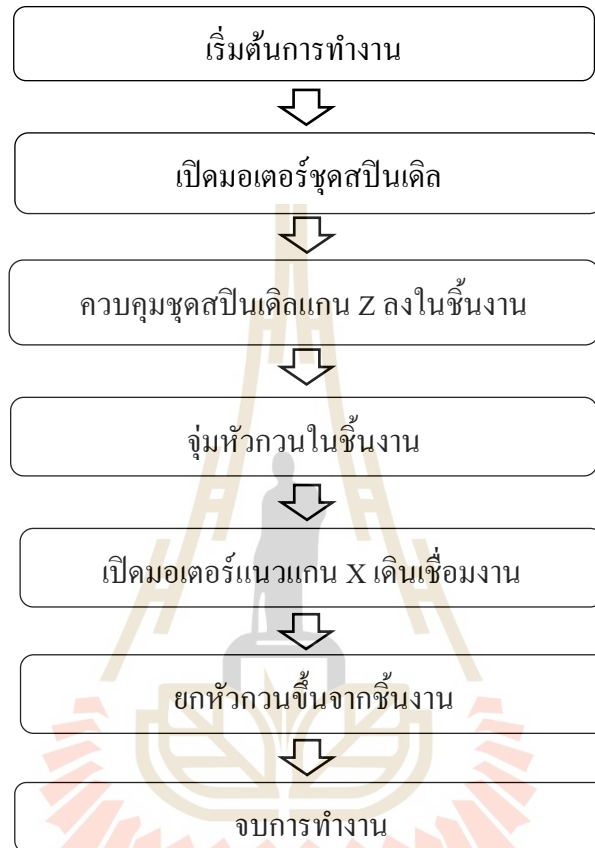
ตารางที่ 3.3 ชิ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องจักร

| ลำดับที่ | ชิ้นส่วน                                                                            | รายละเอียด                                                                                                                          |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        |    | สเต็ปปีงมอเตอร์ กำหนดตำแหน่งของการหมุนด้วยองศาได้ละเอียด ให้แรงบิดในการส่งกำลังสูง 8 Nm.                                            |
| 2        |    | สเต็ปปีงมอเตอร์ ไดรฟ์ เป็นตัวจัดการควบคุมการเคลื่อนที่ ความเร็วของการหมุน และระยะทางที่มอเตอร์หมุน                                  |
| 3        |    | เซอร์โวมอเตอร์ และซึ่งเป็นมอเตอร์แบบเกียร์ที่ให้แรงบิดในการส่งกำลังสูง 15 Nm. ใช้เป็นต้นกำลังชุดสปินเดิล                            |
| 4        |  | เซอร์โวมอเตอร์ไดรฟ์ เป็นตัวจัดการควบคุมการเคลื่อนที่ ความเร็วหมุนที่มอเตอร์ และกำลังที่ใช้หมุน                                      |
| 5        |  | ลิเนียร์ไกด์บังคับการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรทำให้เครื่องจักรมีความแม่นยำในการทำงานสูง                                              |
| 6        |  | บอลสกรูใช้สำหรับการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ในแนวหมุนเป็นการเคลื่อนที่ในเชิงเส้น หรือเปลี่ยนจากแรงบิดเป็นแรงผลัก                         |
| 7        |  | ชุดควบคุมความเร็วสเต็ปปีงมอเตอร์ เป็นวงจรควบคุมการทำงาน และมีระบบ Soft Start เมื่อจ่ายไฟครั้งแรก ป้องกันไฟกระชาก มีวงจรควบคุมแรงดัน |



### 3.1.5 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร

จากการออกแบบระบบการทำงานของเครื่องจักรแล้วนั้น ในการเชื่อมเครื่องจักรต้องทำงานเป็นขั้นตอนเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างเป็นระบบ โดยมีขั้นตอนในการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการควบคุมเครื่องจักร

### 3.2 ดำเนินการสร้างต้นแบบเครื่องเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวน

การสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการทดลอง ใช้สถานที่ศูนย์เครื่องมือ 6 และศูนย์เครื่องมือ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทำการทดสอบระบบการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร เพื่อให้การทดลองเชื่อมชิ้นงานมีประสิทธิภาพสูงสุด มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ต้นทุนในการสร้างเครื่องจักรต้นแบบ

| ต้นทุนด้านชิ้นส่วน | ค่าจ้างสำหรับผลิต | ต้นทุนวัสดุทดสอบ | รวม        |
|--------------------|-------------------|------------------|------------|
| 50,000 บาท         | 12,000 บาท        | 5,000 บาท        | 67,000 บาท |

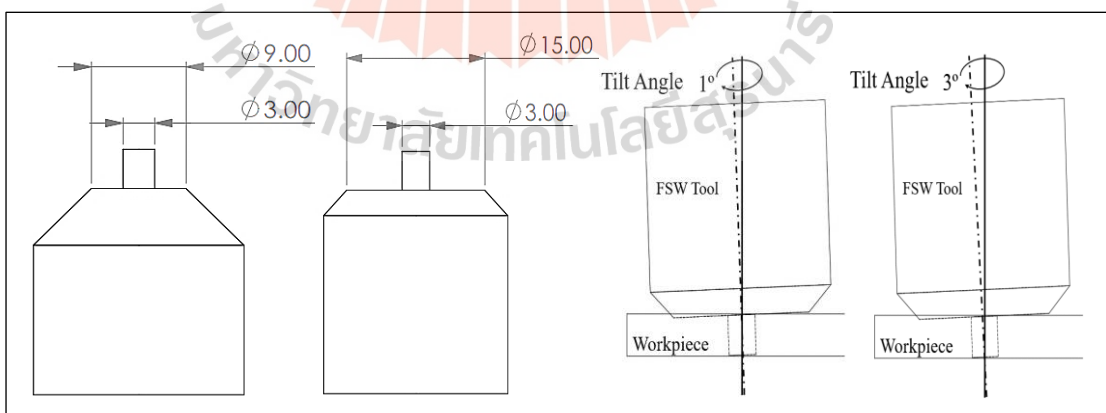
### 3.3 การทดสอบประสิทธิภาพ

#### 3.3.1 ออกแบบการทดลอง

จากการสืบค้นงานวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ผ่านมา ผู้วิจัยเลือกตัวแปรในการทดลองแต่ละระดับ เพื่อทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้การทดลองแบบฟูลเฟกทอเรียล ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 ผู้วิจัยได้ศึกษาตัวแปรในการทดลองคือ ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกวน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางบ่าของเครื่องมือกวน มุมเอียงของเครื่องมือกวน โดยแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 2 ระดับ คือความเร็วหมุนของ 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน 9 และ 15 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือ 1 และ 3 องศา ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที รายละเอียดของเครื่องมือกวนแสดงดังรูปที่ 3.9 และรายละเอียดตัวแปรในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองอะลูมิเนียม 2024

| ตัวแปรในการทดลอง                |                          |                         |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวน | มุมเอียงของเครื่องมือกวน | ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน |
| 1,000                           | 1                        | 9 มิลลิเมตร             |
| 1,200                           | 3                        | 15 มิลลิเมตร            |



รูปที่ 3.9 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางบ่าของเครื่องมือกวน และมุมเอียงของเครื่องมือกวน

ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ผู้วิจัยได้ศึกษาตัวแปรคือ ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือ กวน และความเร็วในการเดินเชื่อม โดยความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกวนแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 1,200, 1,500 และ 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อมแบ่งเป็น 2 ระดับคือ ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ขนาดปากของเครื่องมือ กวน 15 มิลลิเมตร ใช้มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา ตัวแปรในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการทดลองอะลูมิเนียม 5083

| ตัวแปรในการทดลอง                   |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| ความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือกวน | ความเร็วในการเดินเชื่อม |
| 1,200 รอบต่อนาที                   | 30 มิลลิเมตรต่อนาที     |
| 1,500 รอบต่อนาที                   | 60 มิลลิเมตรต่อนาที     |
| 1,800 รอบต่อนาที                   | -                       |

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ อะลูมิเนียม 2024 และอะลูมิเนียม 5083 วัสดุผ่านกระบวนการรีดขึ้นรูป โดยเป็นวัสดุที่ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง การเตรียมชิ้นงานใช้เครื่องกัดแนวตั้งยี่ห้อ Full Mark ทำการกัดขึ้นรูปให้ชิ้นงานมีขนาด 100 X 50 และมีความหนา 4 มิลลิเมตร ในการเชื่อมใช้วิธีการต่อวัสดุแบบต่อชน เครื่องมือกวนออกแบบให้มีลักษณะพินกวนแบบทรงกระบอก ขนาดหัวพินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และเครื่องมือกวนอ้างอิงตามวิธีออกแบบของ (A. Arora, 2011) ตารางที่ 3.7 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียม 2024 และตารางที่ 3.8 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียม 5083

ตารางที่ 3.7 ส่วนผสมทางเคมีของ อะลูมิเนียม 2024

| Cu   | Mg   | Mn   | Si   | Fe   | Zn   | Al   |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 4.56 | 1.57 | 0.65 | 0.50 | 0.50 | 0.04 | Bal. |

ตารางที่ 3.8 ส่วนผสมทางเคมีของ อะลูมิเนียม 5083

| Mg   | Mn   | Si   | Fe   | Cr   | Cu   | Al   |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 4.22 | 0.51 | 0.12 | 0.31 | 0.07 | 0.02 | Bal. |

ตารางที่ 3.9 วัสดุและเครื่องมือในการทดลอง

| กล้องถ่ายภาพความร้อน                                                              | เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า                                                 | วัสดุสำหรับทดลอง                                                                   | เครื่องมือกวน                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |

### 3.3.2 ดำเนินการทดลอง

#### 1) การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

ชิ้นงานมีขนาด 100 X 50 มม. ความหนา 4 มม. ใช้เครื่องกัดตั้ง Bridgeport ณ. ศูนย์เครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเตรียมชิ้นงานให้พร้อมสำหรับการเชื่อมต่อทดสอบตามตัวแปรที่กำหนด เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนแสดงดังรูปที่ 3.10



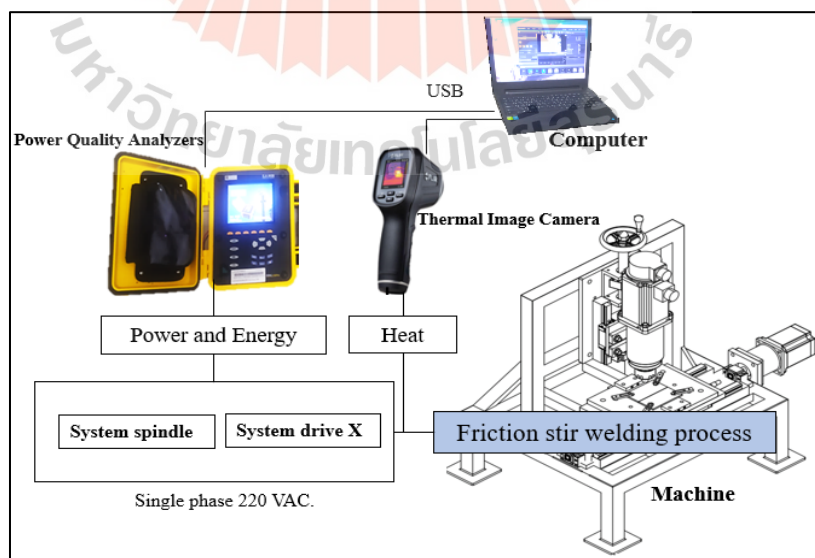
รูปที่ 3.10 เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากรูปที่ 3.10 ในการทดลองเมื่อทำการเตรียมเครื่องจักรสำหรับงานเชื่อมเสียดทานแบบ กวนแล้วนั้น ผู้วิจัยใช้ไดอัลเกจ (Dial gauge) ในการวัดระยะการกดของเครื่องมือกวน และใช้วัด Runout (การหนีศูนย์กลางของวงกลม) ความร่วมศูนย์ของสปินเดิล ทำการติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ Flir รุ่น E50 เพื่อบันทึกอุณหภูมิในการเชื่อม และเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ายี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8435 บันทึกพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อม โดยอุปกรณ์ทั้งสองขึ้นต่อกับคอมพิวเตอร์

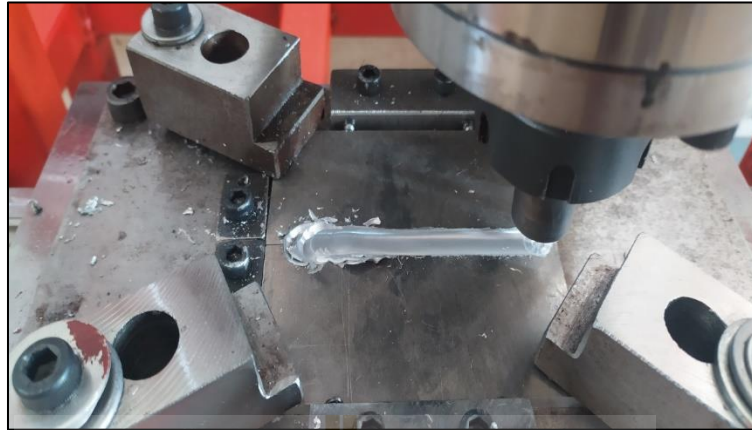


รูปที่ 3.11 คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลความร้อน และพลังงานไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.11 แสดงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ทำการบันทึกข้อมูลความร้อน กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยแผนผังติดตั้งอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



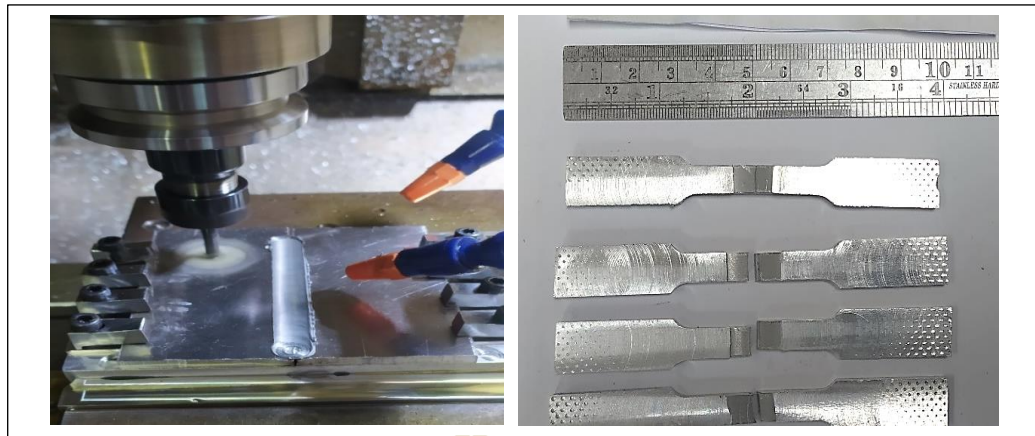
รูปที่ 3.13 การจับยึดชิ้นงานเชื่อมด้วย จิ๊กและฟิกเจอร์



รูปที่ 3.14 เครื่องจักร CNC แบบ 3 แกนสำหรับกัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง

หลังจากทำการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน ตามตัวแปรที่ทำการออกแบบการทดลองไว้ ขั้นตอนต่อไปทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง โดยทำการตัดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน (Tensile test) ASTM E8 ใช้เครื่องกัด (CNC 3 แกน) ยี่ห้อ Bridgeport รุ่น VMC 500 โดยให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นทดสอบ





ก)

ข)

รูปที่ 3.15 ก) จิกและฟีกเจอร์สำหรับกัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึง ข) ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

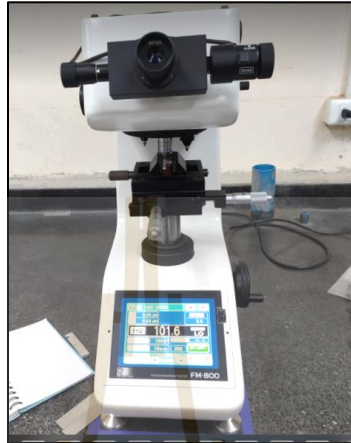
### 3.3.3 ทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบแรงดึงโดยใช้มาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8 เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเชื่อมของเครื่องจักร ทำการทดสอบแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงอนกประสงค์ LLOYD รุ่น 100 KN ใช้ความเร็วในการดึงที่ 1.002 มิลลิเมตรต่อนาที เครื่องทดสอบแรงดึงแสดงดังรูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์แสดงดังรูปที่ 3.17 และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Leica รุ่น DM300 แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อม ทำการตัดขวางแนวเชื่อม และทำการกดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมไปทั้งด้าน AS และด้าน RS ระยะในการกด 0.2 มิลลิเมตร แรงในการกด 100 Kg. ระยะเวลาในการกด 10 วินาที โดยใช้หัวกดแบบเพชร



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

การตรวจสอบโครงสร้าง ทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 จนถึง เบอร์ 2,000 แล้วขัดด้วยผงอะลูมินาความละเอียด 5 ไมโครเมตร และตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังรูป

3.18



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็กต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมนั้น จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่กล่าวมาในบทที่ 3 ในส่วนผลการดำเนินงานผู้วิจัยได้แสดงและอธิบายผลการดำเนินงานเป็นประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร โดยผลการทดลองและวิเคราะห์ผล มีรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

#### ผลการวิจัย




- 4.1 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร
- 4.2 ลักษณะของผิวรอยเชื่อม
- 4.3 การใช้กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักร
- 4.4 อุณหภูมิกระบวนการเชื่อม
- 4.5 สมบัติทางกลของรอยเชื่อม
- 4.6 ผลวิเคราะห์สถิติ
- 4.7 สรุปผลและอภิปราย

หัวข้อแรกเป็นการดำเนินงานในการสร้างต้นแบบเครื่องจักร รายละเอียดของเครื่องจักรหัวข้อถัดไปเป็นการอธิบายผลการทดลองที่เกิดจากการใช้เครื่องจักรทำการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 และ 5083 คือ ผิวของแนวเชื่อม กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน

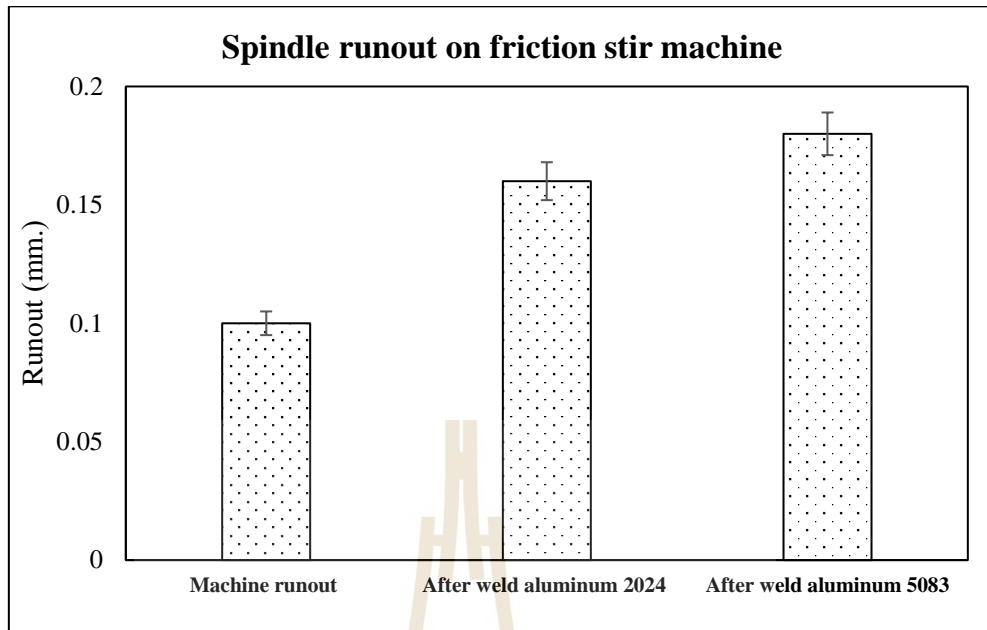
#### 4.1 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร

จากการออกแบบและดำเนินการสร้างเครื่องจักรต้นแบบ ผู้วิจัยได้อธิบายชิ้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของเครื่องจักรโดยชิ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องจักรออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ โครงสร้างเครื่องจักร ชุดสปินเดิล และชุดจับยึดชิ้นงาน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบหลักของเครื่องจักร

| ชิ้นส่วน<br>เครื่องจักร                   | ลักษณะ                                                                              | ประสิทธิภาพและการทำงาน                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| โครงสร้างและ<br>ของเครื่องจักร            |    | โครงสร้างของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบ<br>กวนนั้น มีขนาดกว้าง 50 ซม. ยาว 60 ซม. สูง<br>80 ซม. มีโต๊ะสำหรับรองรับชิ้นงาน ติดตั้ง<br>ตรงกลาง สเต็ปมอเตอร์ของชุดแกน X ติดตั้ง<br>ด้านข้างเครื่องจักร |
| ชุดสปินเดิล                               |   | ชุดสปินเดิลของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบ<br>กวนมีกำลังไฟฟ้า 1,500 วัตต์ และแรงบิด 15<br>นิวตันเมตร ความเร็วรอบสูงสุด 2,500 รอบ<br>ต่อนาที มีระยะเคลื่อนที่แนวแกน Z 50<br>มิลลิเมตร                |
| โต๊ะรองรับ<br>ชิ้นงานและ<br>อุปกรณ์จับยึด |  | ชุดจิ๊กและฟิกเจอร์ในการจับยึดชิ้นงาน ใ้<br>ชิ้นงานได้ใหญ่ที่สุดคือ 200 X 150 X 6<br>มิลลิเมตร ความเร็วในการเคลื่อนที่แกน X<br>สูงสุด 100 มิลลิเมตรต่อนาที                                       |

จากการดำเนินงานออกแบบและสร้างเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็ก สำหรับ  
อะลูมิเนียมผสม มีรายละเอียดโดยรวมของเครื่องจักรคือ เครื่องจักรมีขนาด 50 X 60 X 80  
เซนติเมตร ใช้ไฟฟ้า 220 VAC. ความถี่ 50 Hz ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z 50 มิลลิเมตร ระยะ  
การเคลื่อนที่ในแนวแกน X 200 มิลลิเมตร ชุดสปินเดิลสามารถใส่เครื่องมือกวนเส้นผ่านศูนย์กลาง  
สูงสุด 20 มิลลิเมตร ความเร็วรอบในการหมุนของสปินเดิลสูงสุด 2,500 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุด  
15 นิวตันเมตร ชุดจิ๊กและฟิกเจอร์สามารถใส่ชิ้นงานได้ 200 X 150 มิลลิเมตร ความหนาของชิ้นงาน  
สูงสุด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 ข้อมูล Runout ชุดสปินเดิลของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากรูปที่ 4.1 ผลการวัดค่า Runout (การหนีศูนย์กลางของวงกลม) ชุดสปินเดิลของเครื่องจักรพบว่าจากการสร้างเครื่องจักรได้ทำการวัดค่า Runout ได้ 0.1 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องจักรโดยการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 ทั้งหมด 18 ครั้ง ค่า Runout เพิ่มขึ้นเป็น 0.16 มิลลิเมตร จากนั้นได้ทำการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ทั้งหมด 12 ครั้ง ค่า Runout เพิ่มขึ้นเป็น 0.18 มิลลิเมตร เห็นได้ว่าค่า Runout เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการใช้งานเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพยังอยู่ในระดับที่สามารถใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ ดังนั้นเครื่องจักรสามารถรับแรงกระทำจากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้

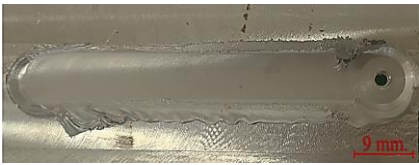



#### 4.2 ลักษณะผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องจักร ผู้วิจัยได้ดำเนินงานทดสอบโดยเชื่อมชิ้นงานอะลูมิเนียม 2024 และอะลูมิเนียม 5083 การทดลองใช้วิธีการเชื่อมต่อวัสดุแบบแบบต่อชน โดยตัวแปรการทดลองได้ออกแบบ และอ้างอิงตามงานวิจัยที่กล่าวในบทที่ 3 ลักษณะกายภาพของผิวรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังนี้


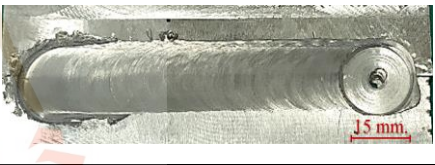

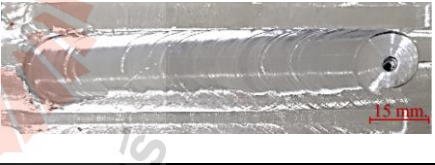


#### 4.2.1 ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสม 2024

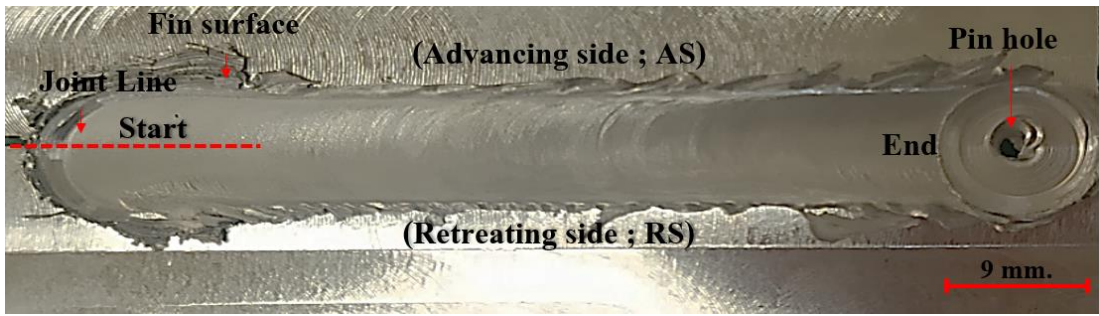
ตารางที่ 4.2 ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน มุมเอียงเครื่องมือกวน 1 องศา

| Factor                    | Shoulder Pin 9 (mm.)                                                              | Shoulder Pin 15 (mm.)                                                              |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotational speed 1000 RPM |  |  |
| Rotational speed 1200 RPM |  |  |

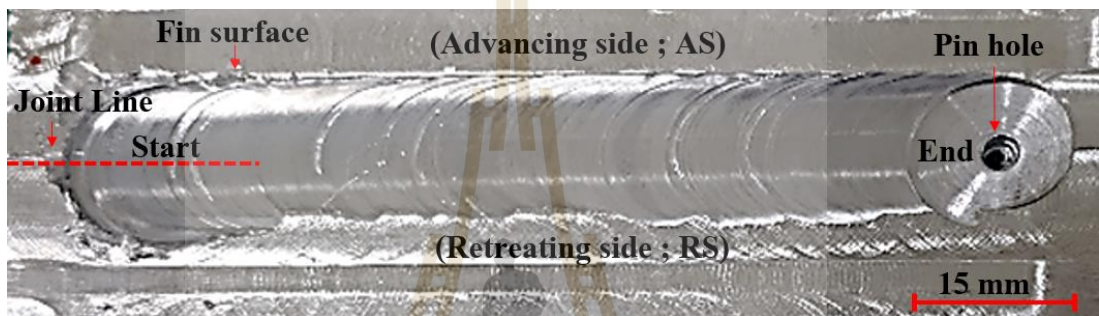
ตารางที่ 4.3 ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน มุมเอียงเครื่องมือกวน 3 องศา

| Factor                    | Shoulder Pin 9 (mm.)                                                                | Shoulder Pin 15 (mm.)                                                                |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotational speed 1000 RPM |  |  |
| Rotational Speed 1200 RPM |  |  |

จากการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 พบว่า ผิวของชิ้นงานนั้นมีความกว้างตามขนาดของ ป่าชิ้นงาน คือป่าเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร และความเรียบผิวแนวของชิ้นงาน แปรผันตามตัวแปรที่ทดลอง ผิวชิ้นงานเกิดครีบกใน ส่วน (Advancing side ; AS) ของแนวเชื่อม และเกิดครีบกที่จุดเริ่มเชื่อมเนื่องจากการจุ่มแช่เครื่องมือกวนในชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนสะสมใน ชิ้นงาน ผิวชิ้นงานที่มีความเรียบที่สุดคือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที โดยแสดงรายละเอียด ดังรูปที่ 4.1 สอดคล้องกับคำกล่าวของ (สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, 2558) ลักษณะผิวเชื่อมเป็นแนวยาวมี ผิวชิ้นงานมันวาว รอยเชื่อมในบางตัวแปรการทดลองมีเนื้อวัสดุถูกกวาดไปทางด้านแอดวานซ์ซิ่ง (AS) และทำให้ผิวแนวเชื่อมของบางตัวแปรเกิดครีบกที่ขอบแนวเชื่อม ผิวของแนวเชื่อมแสดงดังรูป ที่ 4.2



ก



ข







รูปที่ 4.2 ก) ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน ขนาดป่าเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร

ข) ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน ขนาดป่าเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร

ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

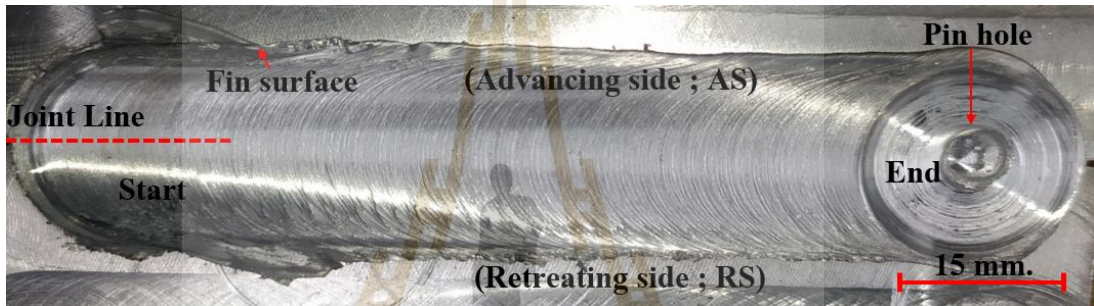
4.2.2 ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอะลูมิเนียม 5083

ตารางที่ 4.4 ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

| Factor                       | Feed rate -30 mm./Min                                                               | Feed rate -30 mm./Min                                                                |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotational speed<br>1200 RPM |  |  |
| Rotational speed<br>1500 RPM |  |  |
| Rotational speed<br>1800 RPM |  |  |



จากการทดลองเชื่อมในอะลูมิเนียม 5083 พบว่าผิวของชิ้นงานนั้นมีความกว้างตามขนาดของบ่าชิ้นงาน 15 มิลลิเมตร และความเรียบผิวของแนวเชื่อมมีความเรียบแปรผันตามตัวแปรที่ทดลอง และแสดงรอยกวนของเครื่องมือ โดยผิวชิ้นงานมักจะเกิดครีปในส่วน (Advancing side ; AS) ของแนวเชื่อม และพบว่าเกิดครีปที่จุดเริ่มเชื่อมเนื่องจากการจุ่มแช่เครื่องมือกวนในชิ้นงานเกิดความร้อนสะสมในชิ้นงาน และผิวชิ้นงานแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับคำกล่าวของ (สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, 2558) ลักษณะผิวเชื่อมเป็นแนวยาวมีผิวชิ้นงานมันวาว รอยเชื่อมในบางตัวแปรการทดลองมีเนื้อวัสดุถูกกวนไปทางด้านแอดวานซิ่ง (AS) และทำให้เกิดครีปที่ขอบแนวเชื่อมแสดงให้เห็นการไหลของเนื้อวัสดุ



รูปที่ 4.3 ผิวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083

#### 4.3 กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากการทดลองโดยทำการเชื่อมชิ้นงานในอะลูมิเนียม 2024 และอะลูมิเนียม 5083 ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรคือ ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวน ขนาดบ่าของเครื่องมือกวนมุมเอียงของเครื่องมือกวน และความเร็วในการเดินเชื่อมนั้น พบว่าพฤติกรรมการใช้กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า แปรผันตามลักษณะของการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวนในขณะที่ทำการเชื่อมอธิบายได้ดังนี้

##### 4.3.1 กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 2024

การเกิดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม มีลักษณะเป็นเส้นแนวโน้มขึ้น-ลง เปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน โดยการใช้กระแสไฟฟ้าของขนาดบ่าเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร มีการเกิดกระแสไฟฟ้าต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 อธิบายดังนี้

1) การใช้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิล ในการเชื่อมโดยใช้เครื่องมือกวานขนาดบ่า 15 มิลลิเมตร

A เมื่อเริ่มจุ่มพินกวาน ลงในชิ้นงานอะลูมิเนียม กระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงตามช่วงเวลาในการกด (การเชื่อมเสียดทานแบบกวานจะค่อยๆ กดพินกวานลงในชิ้นงานเพื่อให้เกิดความร้อนสะสมในชิ้นงาน)

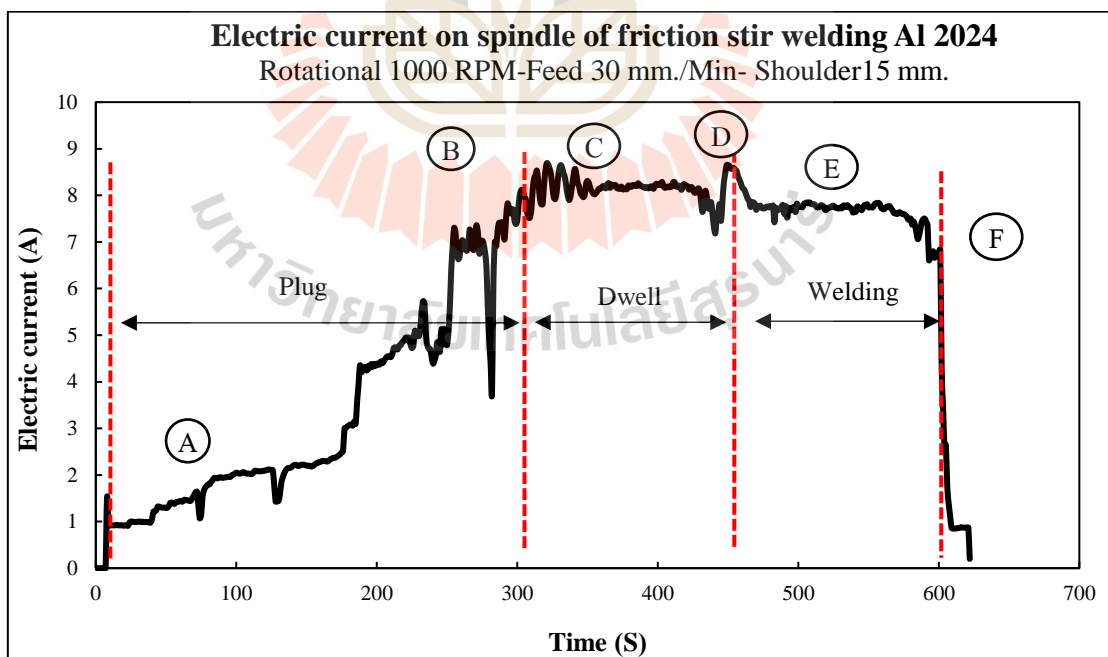
B เมื่อกดพินกวานลงไปจุดสุด และบ่าของเครื่องมือกวานแตะลงในชิ้นงานจะใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

C เมื่อทำการแซ่พินกวานในขณะที่บ่ากดในชิ้นงานกระแสไฟฟ้าจะลดลง และมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเนื่องจากเกิดความร้อนสะสมในชิ้นงาน ในขั้นตอนนี้จะแซ่เครื่องมือกวานไว้ในช่วงเวลา 4 – 6 นาที เพื่อให้เกิดอุณหภูมิ 350 – 380 องศาเซลเซียส

D เมื่อเริ่มเดินเชื่อมจะเกิดการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

E ในขณะที่ทำการเดินเชื่อมหรือเคลื่อนที่เครื่องมือกวานกระแสไฟฟ้าจะคงที่ โดยมีแนวโน้มขึ้น-ลงเล็กน้อย

F เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเชื่อมกระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อยกหัวพินขึ้นจากชิ้นงาน



รูปที่ 4.4 แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิลกระบวนการเชื่อมในอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้เครื่องมือกวานขนาดบ่า 15 มิลลิเมตร

2) การใช้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปีดในการเชื่อมโดยใช้เครื่องมือกวนขนาด 9 มิลลิเมตร

A เมื่อเริ่มจุ่มพินกวนลงในชิ้นงานอะลูมิเนียมกระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงตามช่วงเวลาในการกด (การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะค่อยๆ กดพินกวนลงในชิ้นงานเพื่อให้เกิดความร้อนสะสมในชิ้นงาน)

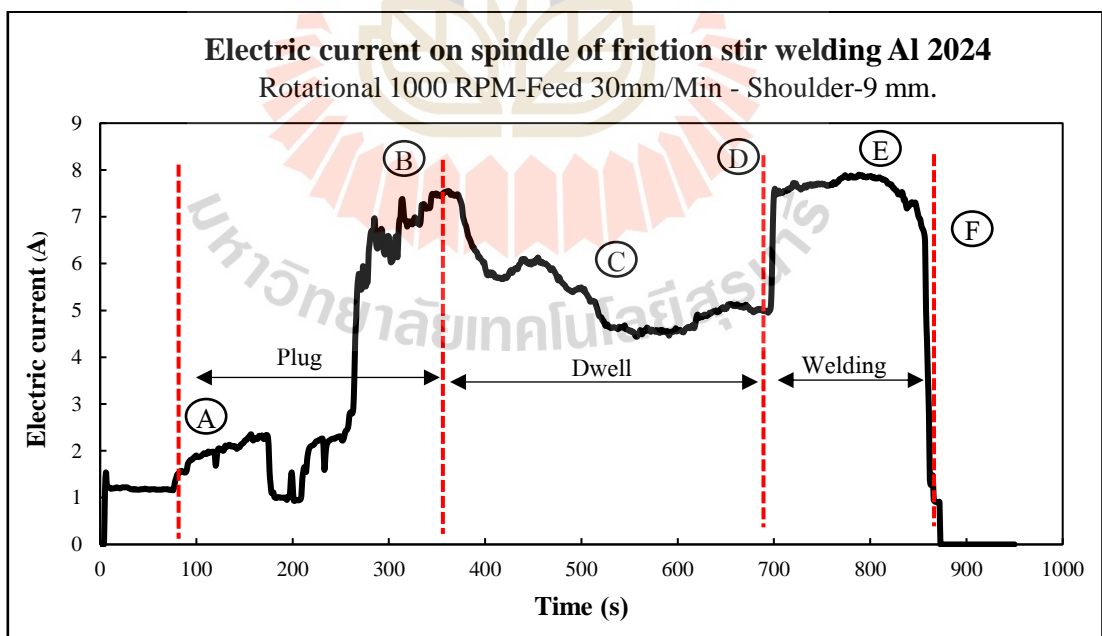
B เมื่อกดพินกวนลงไปถึงจุดสุดท้ายของเครื่องมือกวนแต่ละลงในชิ้นงานจะเกิดกระแสไฟฟ้าสูงสุด

C เมื่อทำการแซ่พินกวนในขณะที่บ่าเครื่องมือกวนกดในชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากเกิดความร้อนสะสมในชิ้นงาน ในขั้นตอนนี้จะแซ่เครื่องมือกวนไว้ในช่วงเวลา 4 – 6 นาที เพื่อให้เกิดอุณหภูมิ 350 – 380 องศาเซลเซียส

D เมื่อเริ่มเดินเชื่อมจะเกิดการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

E ในขณะที่ทำการเดินเชื่อมหรือเคลื่อนที่ที่เครื่องมือกวนกระแสไฟฟ้าจะคงที่โดยมีแนวโน้มขึ้น - ลงเล็กน้อย

F เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเชื่อมกระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อยกหัวพินขึ้นจากชิ้นงาน

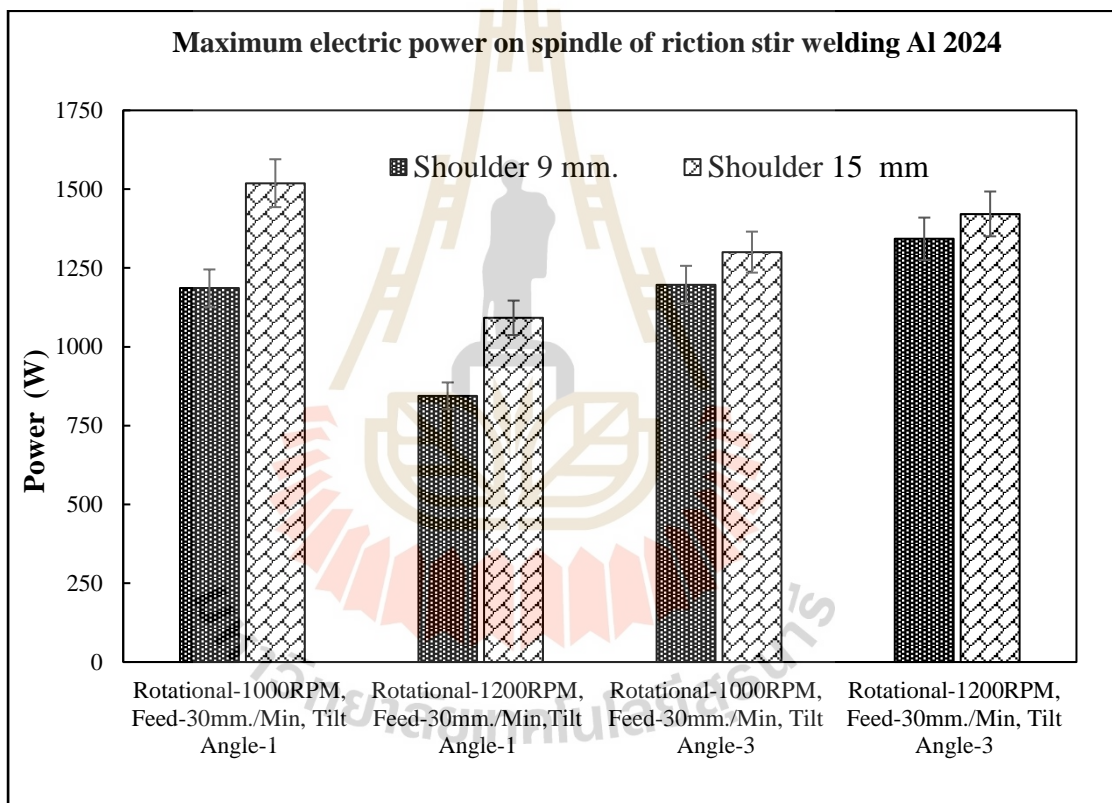


รูปที่ 4.5 แนวโน้มกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปีดกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้เครื่องมือกวนขนาด 9 มิลลิเมตร

จากการทดลองพบว่าการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกลส่งผลต่อการใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และตัวแปร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางบ่าของเครื่องมือกล ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกล และมุมเอียงของเครื่องมือกล มีผลต่อกระแสไฟฟ้า

3) กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สปีนเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

กำลังไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 นาที มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) หรือจูลต่อวินาที อธิบายได้ว่าแปรผันตามแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ไปในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำการเปรียบเทียบตามขนาดบ่าของเครื่องมือกล แสดงดังรูปที่ 4.5



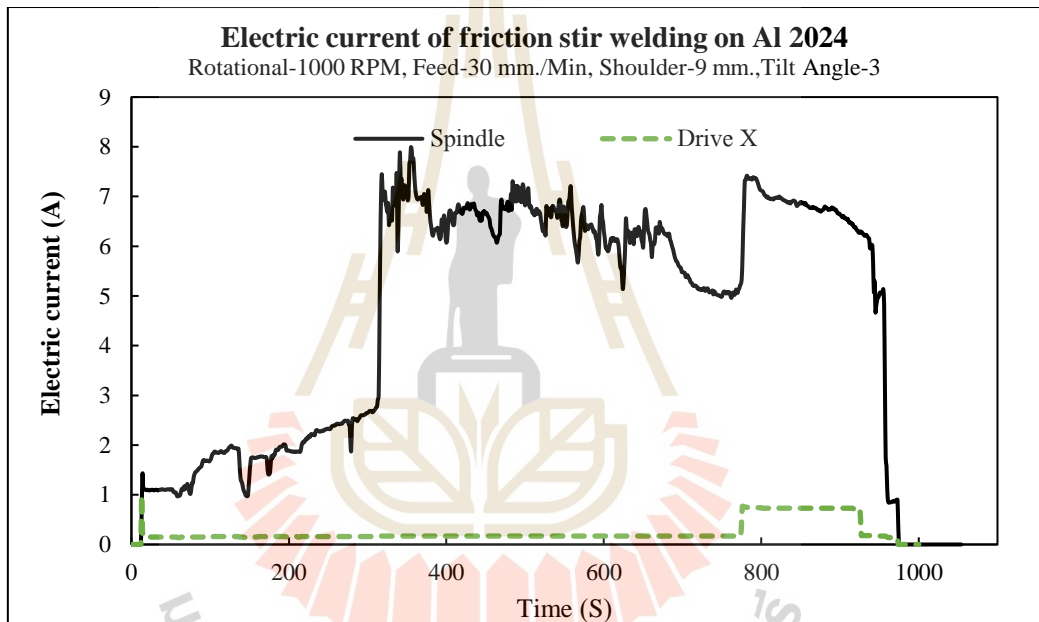
รูปที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของชุดสปีนเดิล ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้อะลูมิเนียม 2024

จากรูปที่ 4.6 แสดงการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าขนาดบ่าของเครื่องมือกลมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นต่างกัน และแปรผันตามความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือกล มุมเอียงของเครื่องมือกล ตัวแปรที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือความเร็ว

รอบหมุนของเครื่องมือกวน 1,000 รอบต่อนาที ขนาดปากของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร และใช้ มุมเอียง 1 องศา กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,519 วัตต์ (W)

4.) กำลังไฟฟ้ามอเตอร์ชุดสปินเดิล และชุดมอเตอร์แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น นอกจากมอเตอร์ชุดสปินเดิลแล้ว ยังมีชุดส่ง กำลังแกน X ที่ขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์ แต่จากกระบวนการเชื่อมพบว่าชุดมอเตอร์แกน X มีการ ใช้กระแสไฟฟ้าเล็กน้อย เนื่องจากในแรงกระทำในแนวแกน X เกิดขึ้นน้อยกว่าแกน Z โดยแนวโน้ม การเกิดกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมของมอเตอร์สปินเดิล และมอเตอร์ แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

จากรูปที่ 4.6 พบว่าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แนวโน้มกระแสไฟฟ้าของ สปินเดิลเกิดขึ้นตามการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน และกำลังไฟฟ้าของชุดมอเตอร์แกน X นั้น เกิดขึ้นในช่วงเดินเชื่อม และจากการทดลองในตัวแปรอื่น ๆ เกิดแนวโน้มของกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกัน ลักษณะกระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมของมอเตอร์สปินเดิล และมอเตอร์แกน X สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Gianluca Buffa, 2018)

### 5) พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิลในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

การใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน Electric Energy (Wh.) หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมดในกระบวนการ บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ต้องใช้พลังงานเพื่อให้เกิดความร้อนจากการเสียดทานของเครื่องมือกวนกับวัสดุ และ การใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงานของเครื่องจักรเกิดขึ้นจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไป แสดงดังตารางที่ 4.5

ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ช่วงคือการใช้พลังงานช่วงจุ่ม การใช้พลังงานช่วงจุ่มแช่ การใช้พลังงานช่วงเดินเชื่อม

พลังงานไฟฟ้าช่วงจุ่มเครื่องมือกวน (Plug) หมายถึงพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องจักรใช้เป็นกระบวนการเคลื่อนที่เครื่องมือกวนจุ่มลงในชิ้นงาน

พลังงานไฟฟ้าช่วงจุ่มแช่ (Dwell) หมายถึงพลังงานไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาแช่เครื่องมือกวนในชิ้นงานเพื่อให้ความร้อนกระจายไปในชิ้นงาน เพื่อลดรอยดำหนิ หรือรูในชิ้นงาน อ้างอิงตามงานวิจัยของ (วรพงค บุญช่วยแทน, 2560) ทำให้อะลูมิเนียมเกิดการหลอมละลายที่ดี สามารถไหลวนรอบๆ หัวพินได้สะดวกก่อนเดินเชื่อมด้วยความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนด

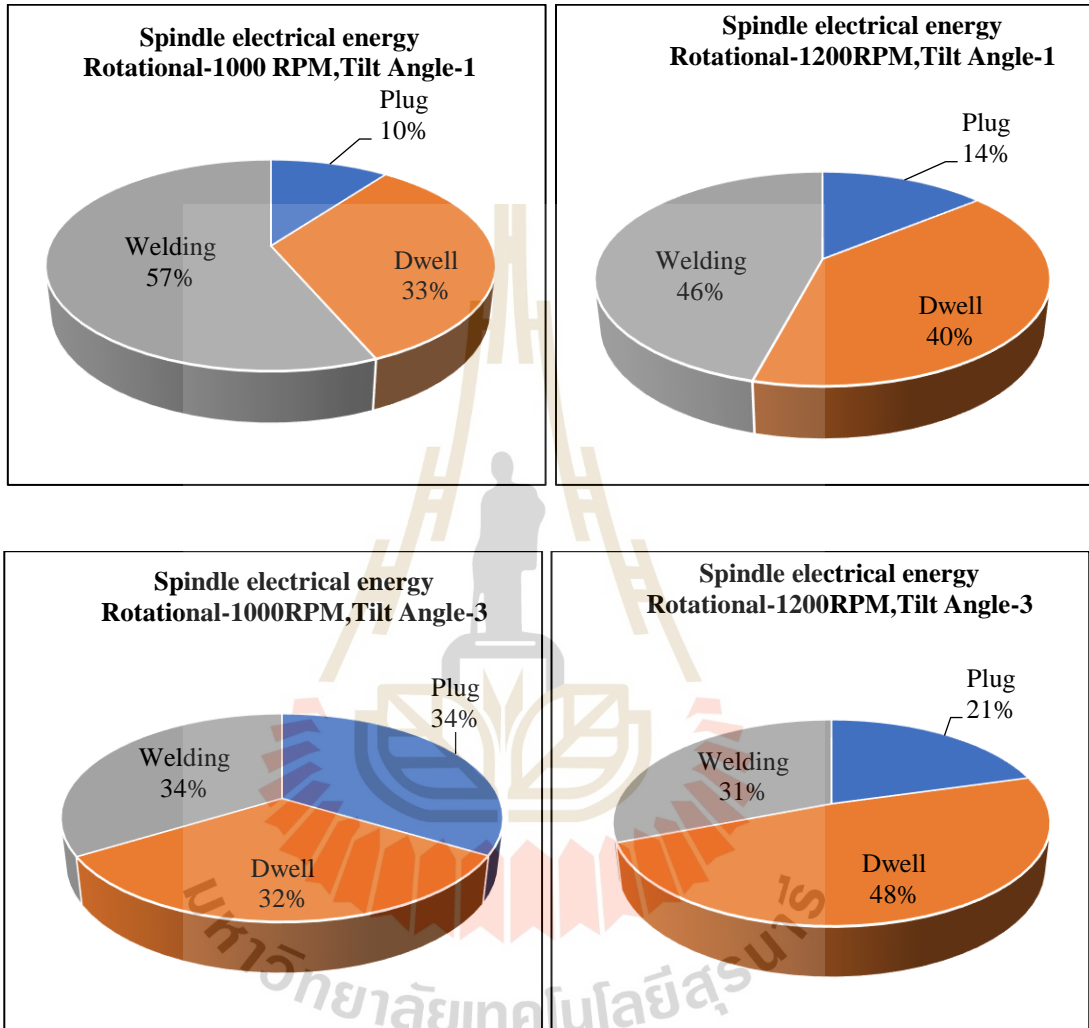
พลังงานไฟฟ้าช่วงเดินเชื่อม (Welding) หมายถึงพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเคลื่อนที่เครื่องมือกวนไปตามแนวเชื่อมเพื่อเชื่อมชิ้นงาน

ตารางที่ 4.5 พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

| ลำดับที่ | ตัวแปร                  |                                | เปอร์เซ็นต์พลังงานไฟฟ้า |         |            |       |
|----------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------|------------|-------|
|          | ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน | ความเร็วในการหมุนเครื่องมือกวน | จุ่ม                    | จุ่มแช่ | เดินเชื่อม |       |
| 1        | มุมเอียง 1 องศา         | 9                              | 1,000                   | 25.66   | 45.66      | 28.67 |
| 2        |                         | 9                              | 1,200                   | 12.48   | 59.77      | 27.75 |
| 3        |                         | 15                             | 1,000                   | 10.15   | 33.40      | 56.45 |
| 4        |                         | 15                             | 1,200                   | 14.07   | 40.06      | 45.87 |
| 5        | มุมเอียง 3 องศา         | 9                              | 1,000                   | 10.15   | 33.40      | 56.45 |
| 6        |                         | 9                              | 1,200                   | 21.14   | 50.14      | 28.73 |
| 7        |                         | 15                             | 1,000                   | 33.63   | 32.60      | 33.77 |
| 8        |                         | 15                             | 1,200                   | 20.59   | 48.46      | 30.95 |



จากตารางที่ 4.5 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมทั้ง 3 ช่วงคือ ช่วงจุ่มเครื่องมือกวน ช่วงจุ่มแช่ และเดินเชื่อม ใช้พลังงานไฟฟ้าต่างกันชัดเจน ดังรูปที่ 4.8

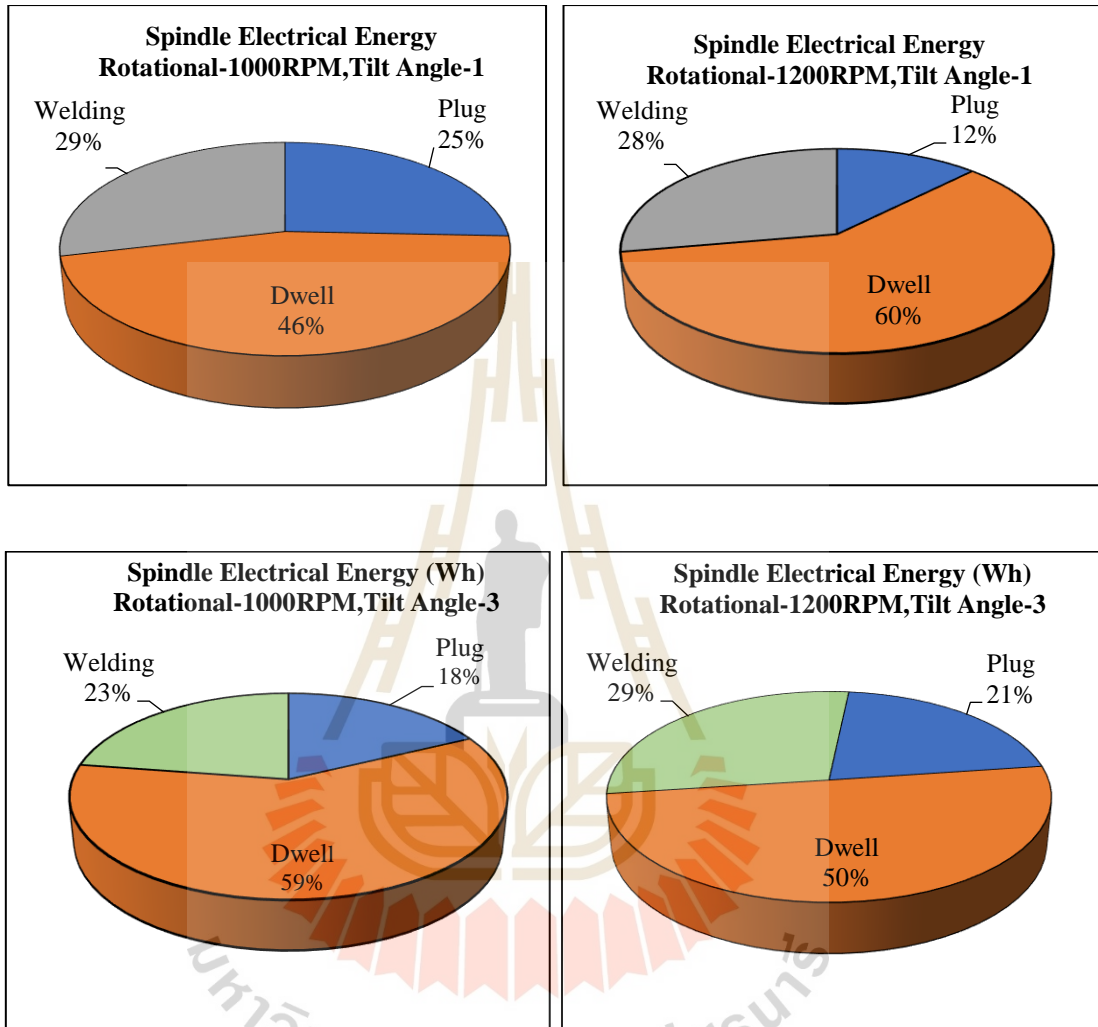


รูปที่ 4.8 การใช้พลังงานไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิล โดยใช้นาฬิกาเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

จากรูปที่ 4.8 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้า ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิลโดยใช้นาฬิกาเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มเครื่องมือกวนอยู่ในช่วง 10 - 34 เปอร์เซ็นต์ พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มแช่อยู่ในช่วง 32 - 48



เปอร์เซ็นต์ และพลังงานไฟฟ้าในช่วงเดินเชื่อม อยู่ในช่วง 31 - 57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการเชื่อมโดยใช้ขนาดปากของเครื่องมือถวาน 15 มิลลิเมตร ช่วงที่ใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากที่สุดคือ ช่วงเดินเชื่อม



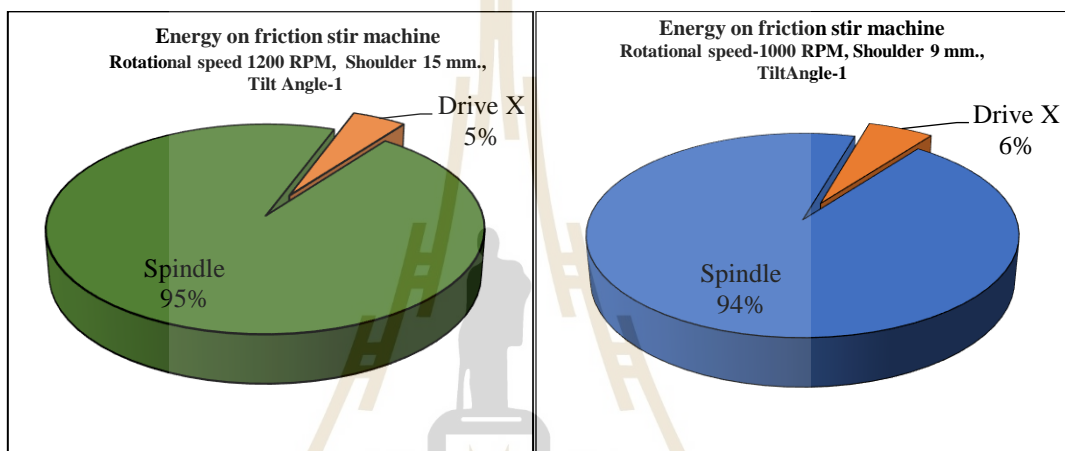
รูปที่ 4.9 การใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบถวาน ของชุดสปินเดิล โดยใช้ขนาดปากเครื่องมือถวาน 9 มิลลิเมตร ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

จากรูปที่ 4.9 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้า ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบถวานของชุดสปินเดิล โดยใช้ขนาดปากเครื่องมือถวาน 9 มิลลิเมตร พบว่าใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มเครื่องมือถวาน อยู่ในช่วง 12 - 25 เปอร์เซ็นต์ พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มแซ่เครื่องมือถวานอยู่ในช่วง 46 - 60 เปอร์เซ็นต์ และการใช้พลังงานในช่วงเดินเชื่อมอยู่ในช่วง 23 - 29 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากที่สุดคือ การใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มแซ่เครื่องมือถวาน

ข้อสรุปด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล พบว่าการเชื่อมโดยใช้บ่าของเครื่องมือทวน 9 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร ใช้พลังงานไฟฟ้าแตกต่างกัน

#### 6) พลังงานไฟฟ้าชุดมอเตอร์แกน X

ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบทวน ในอะลูมิเนียม 2024 การใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล และชุดมอเตอร์แกน X นั้น พบว่าชุดสปินเดิลมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าชุดมอเตอร์แกน X โดยอัตราส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.10



ก)

ข)

รูปที่ 4.10 ก) พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิลและชุดแกน X ขนาดบ่าเครื่องมือทวน 15 มิลลิเมตร

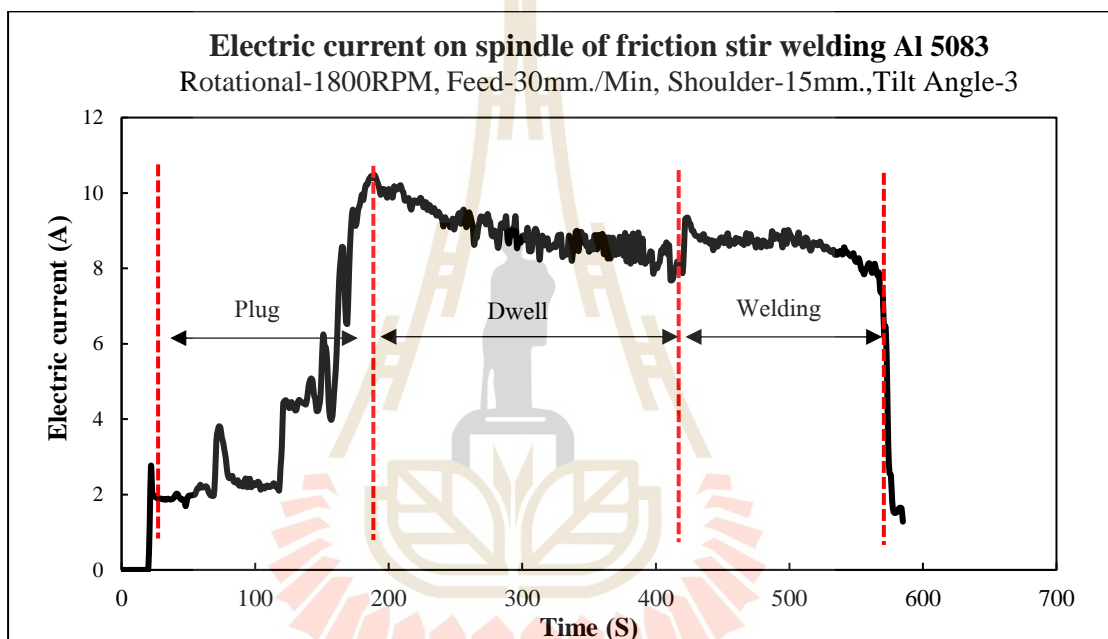
ข) พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิลและชุดแกน X ขนาดบ่าของเครื่องมือทวน 9 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.10 การใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล และการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดแกน X โดยใช้ขนาดบ่าเครื่องมือทวน 15 มิลลิเมตร และบ่าของเครื่องมือทวน 9 มิลลิเมตร พบว่าในกระบวนการเชื่อมมีการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล คิดเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ การใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดแกน X คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการเชื่อมใช้ไปในการทำงานของชุดสปินเดิล สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Gianluca Buffa, 2018) ที่กล่าวว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบทวน เครื่องจักรใช้พลังงานส่วนใหญ่เพื่อเปลี่ยนเป็นความร้อนเสียดทาน

#### 4.3.2 กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิลในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

1) กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิลในการเชื่อมโดยใช้เครื่องมือกวนขนาดบ่า 15 มิลลิเมตร

จากการทดลองในอะลูมิเนียม 5083 พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อม มีลักษณะเป็นเส้นแนวโน้มขึ้น-ลง เหมือนกับการเชื่อมในอะลูมิเนียม 2024 และเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน โดยการใช้กระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.11 ดังนี้



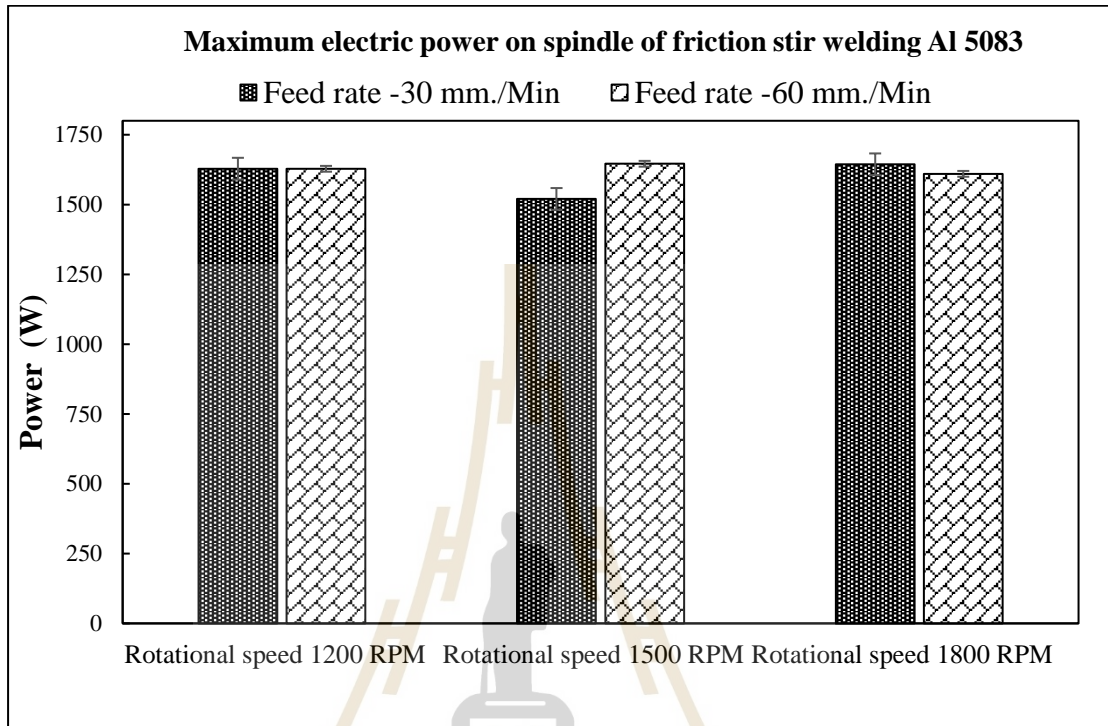
รูปที่ 4.11 แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิล การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083

จากรูปที่ 4.11 พบว่าในช่วงจุ่มเครื่องมือกวนลงในชิ้นงานนั้น กำลังไฟฟ้ามีความแปรปรวนสูงเนื่องจากเครื่องจักรต้องการกำลังงานไฟฟ้า เพื่อให้ชิ้นงานเกิดความร้อนเสียดทาน ส่วนในช่วงเดินเชื่อมจะมีการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าจนถึงเมื่อเดินเชื่อม

2) กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สปินเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

กำลังไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 นาทีมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) หรือจูลต่อวินาที แปรผันตามแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าที่

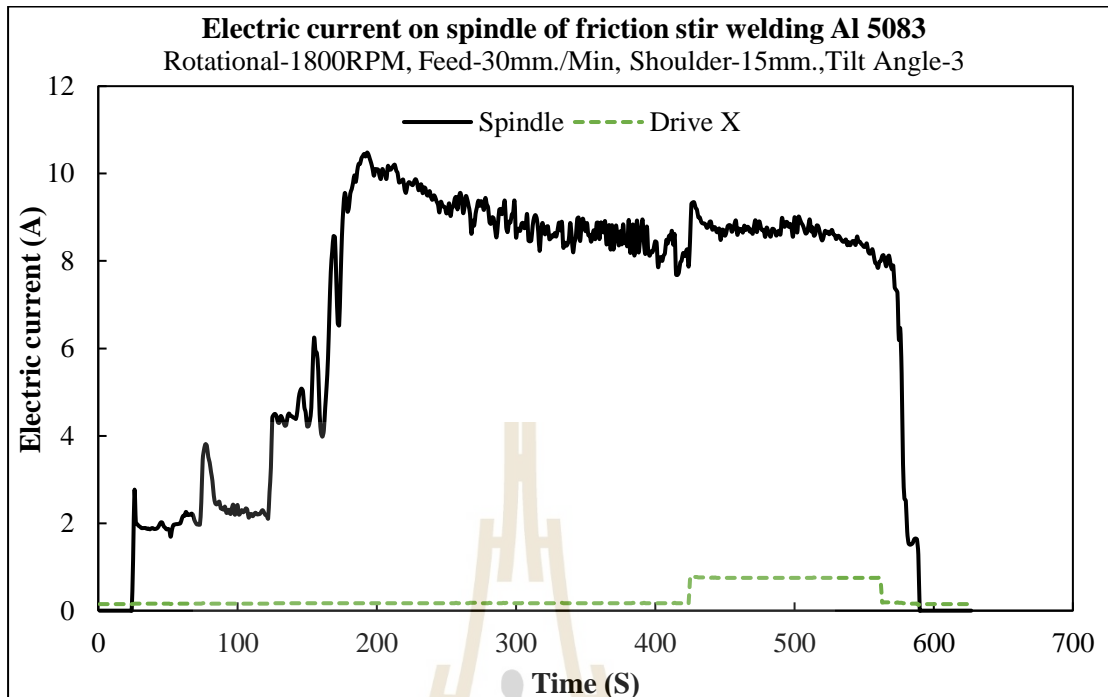
ใช้ไปในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยแนวโน้มกำลังไฟฟ้าจากตัวแปรที่ทำการทดลอง ความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน และความเร็วในการเดินเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าสูงสุดในกระบวนการเชื่อม โดยใช้อะลูมิเนียม 5083

จากรูปที่ 4.12 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้อะลูมิเนียม 5083 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที การใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่แตกต่างกัน เนื่องจากใช้ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร และตัวแปรที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือการใช้ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวน 1,500 รอบต่อนาที ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร และใช้มุมเอียง 3 องศา กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,644 วัตต์

3) กระแสไฟฟ้าชุดสปินเดิล และมอเตอร์ชุดแกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 จากการทดลองกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น นอกจากมีมอเตอร์ชุดสปินเดิลแล้วยังมีชุดแกน X ที่ขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์ แต่จากกระบวนการพบว่าชุดมอเตอร์แกน X มีการใช้กำลังไฟฟ้าเล็กน้อย เนื่องจากแรงกระทำในแนวแกน X เกิดขึ้นน้อยกว่าแกน Z กำลังไฟฟ้าชุดสปินเดิล และชุดแกน X แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แนวโน้มกระแสไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มอเตอร์สปินเดิล และมอเตอร์แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

จากรูปที่ 4.13 พบว่าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แนวโน้มกำลังไฟฟ้าของชุดสปินเดิลเกิดขึ้นตามการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน และกำลังไฟฟ้าของชุดมอเตอร์แกน X นั้นเกิดขึ้นแค่ในช่วงเดินเชื่อม

สรุปเมื่อเปรียบเทียบ การใช้กำลังของมอเตอร์สปินเดิล และมอเตอร์แกน X นั้น ในแต่ละตัวแปร มีแนวโน้มกำลังไฟฟ้าของชุดแกน X เหมือนกันทุกตัวแปร แต่การใช้กำลังของมอเตอร์สปินเดิล นั้นมีการผันแปรตามการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน เนื่องจากการเกิดความร้อนของแต่ละตัวแปรการทดลองนั้นต่างกัน

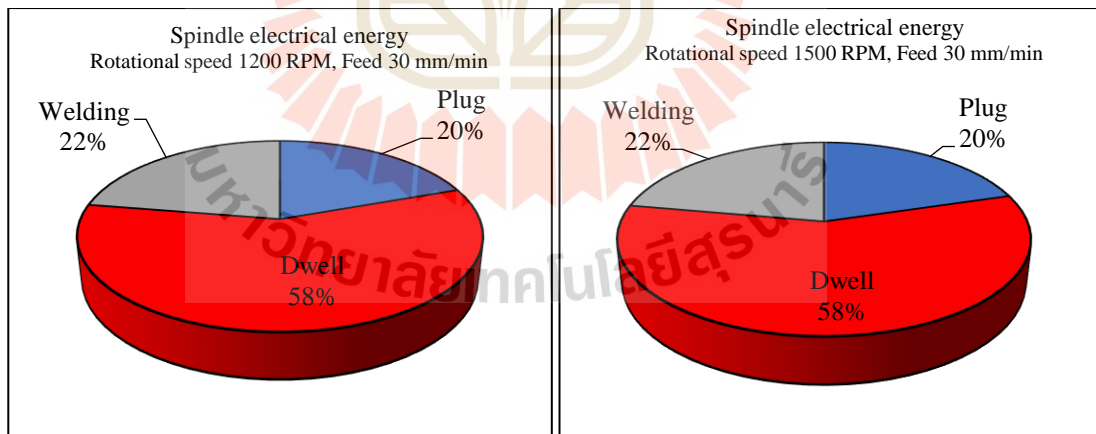
#### 4) พลังงานไฟฟ้าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083

พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน Electric Energy (Wh.) หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าใช้ไปทั้งหมดในกระบวนการ เกิดขึ้นจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไปโดยพบว่า ในช่วงจุ่มเครื่องมือกวนลงในชิ้นงาน เกิดการใช้พลังงานน้อย แต่เมื่อปากของเครื่องมือกวนสัมผัสกับชิ้นงานนั้นเกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง จนถึงขั้นตอนการเดินเชื่อม โดยพลังงานไฟฟ้าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083 ตารางที่ 4.6

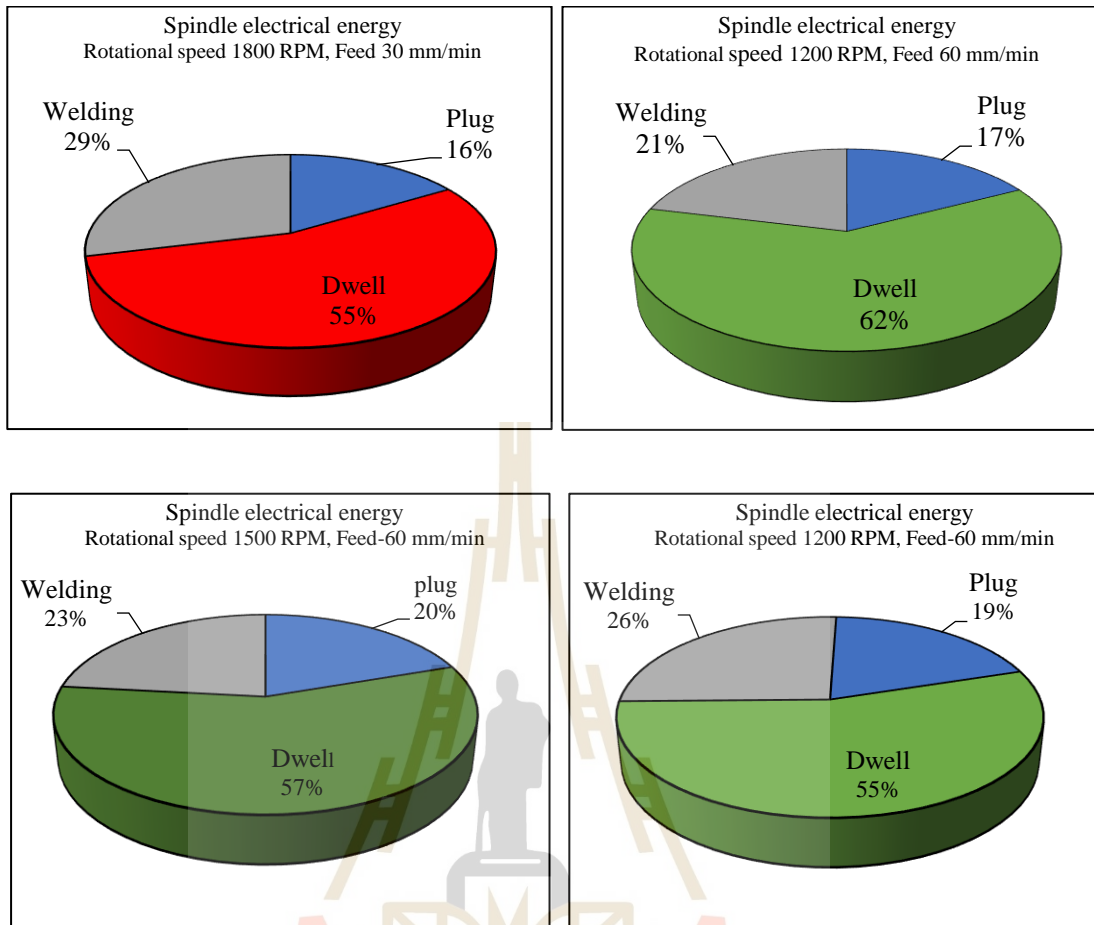
ตารางที่ 4.6 พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

| ลำดับที่ | ตัวแปร                  |                                | เปอร์เซ็นต์พลังงานไฟฟ้า |         |            |
|----------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------|------------|
|          | ความเร็วในการเดินเชื่อม | ความเร็วในการหมุนเครื่องมือทวน | จุ่ม                    | จุ่มแช่ | เดินเชื่อม |
| 1        | 30                      | 1,200                          | 19.58                   | 57.98   | 22.44      |
| 2        | 30                      | 1,500                          | 20.36                   | 57.45   | 22.18      |
| 3        | 30                      | 1,800                          | 16.39                   | 54.80   | 28.81      |
| 4        | 60                      | 1,200                          | 17.40                   | 61.44   | 21.16      |
| 5        | 60                      | 1,500                          | 19.74                   | 56.96   | 23.30      |
| 6        | 60                      | 1,800                          | 19.55                   | 54.62   | 25.83      |

จากตารางที่ 4.6 การใช้พลังงานในการเชื่อมเสียดทานแบบทวน นั้น แสดงให้เห็นว่า การเชื่อมทั้ง 3 ช่วงคือ ช่วงจุ่มเครื่องมือทวน ช่วงจุ่มแช่ และเดินเชื่อม โดยเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 พลังงานไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบทวนของชุดสปินเดิล ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.15 พลังงานไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิล ในการเชื่อม อะลูมิเนียม 5083 ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที

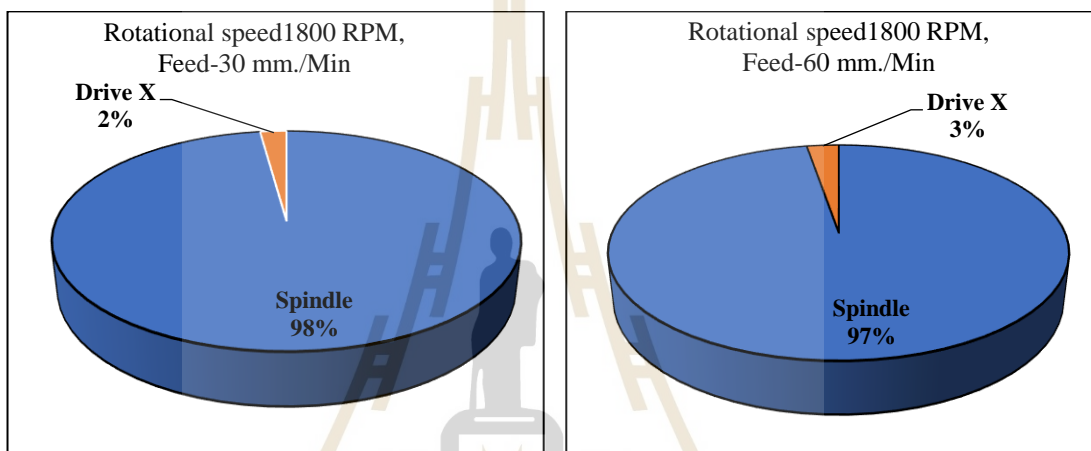
จากรูปที่ 4.15 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้า ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียม 5083 ของชุดสปินเดิล โดยใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มเครื่องมือกวน 16 - 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มแช่อยู่ในช่วง 55 - 62 เปอร์เซ็นต์ และการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเดินเชื่อม อยู่ในช่วง 22 - 29 เปอร์เซ็นต์

การเชื่อมโดยใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าพลังงานไฟฟ้าของ ชุดสปินเดิล ในช่วงจุ่มเครื่องมือกวนอยู่ใน 17 - 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานไฟฟ้าในช่วงจุ่มแช่ เครื่องมือกวน อยู่ในช่วง 55 - 62 เปอร์เซ็นต์ และการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเดินเชื่อม อยู่ในช่วง 21-29 เปอร์เซ็นต์



สรุปด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิลในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 โดยใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเหมือนกัน

5) พลังงานไฟฟ้าชุดสปินเดิล และชุดมอเตอร์แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 การใช้พลังงานในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชุดสปินเดิล และชุดมอเตอร์แกนนั้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การใช้พลังงานส่วนมากของกระบวนการ เป็นการใช้พลังงานของชุดสปินเดิลโดยแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 พลังงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ของชุดสปินเดิล และชุดมอเตอร์แกน X ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083


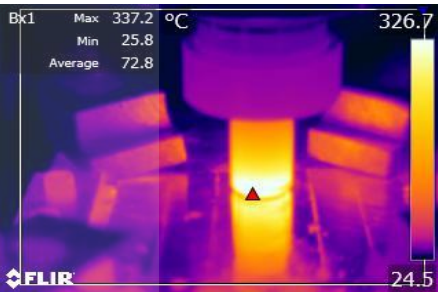
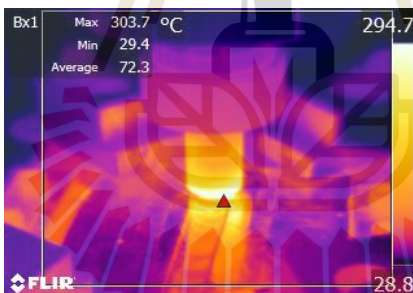

จากรูปที่ 4.16 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดสปินเดิล และการใช้พลังงานของและชุดมอเตอร์แกน X โดยใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าในกระบวนการเชื่อมพบว่าการใช้พลังงาน ของชุดสปินเดิลคิดเป็น 97 - 98 เปอร์เซ็นต์ และการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ชุดแกน X ในช่วง 2 - 3 เปอร์เซ็นต์ สรุปการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการเชื่อมนี้ใช้ไปในการทำงานของชุดสปินเดิล

#### 4.4 อุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

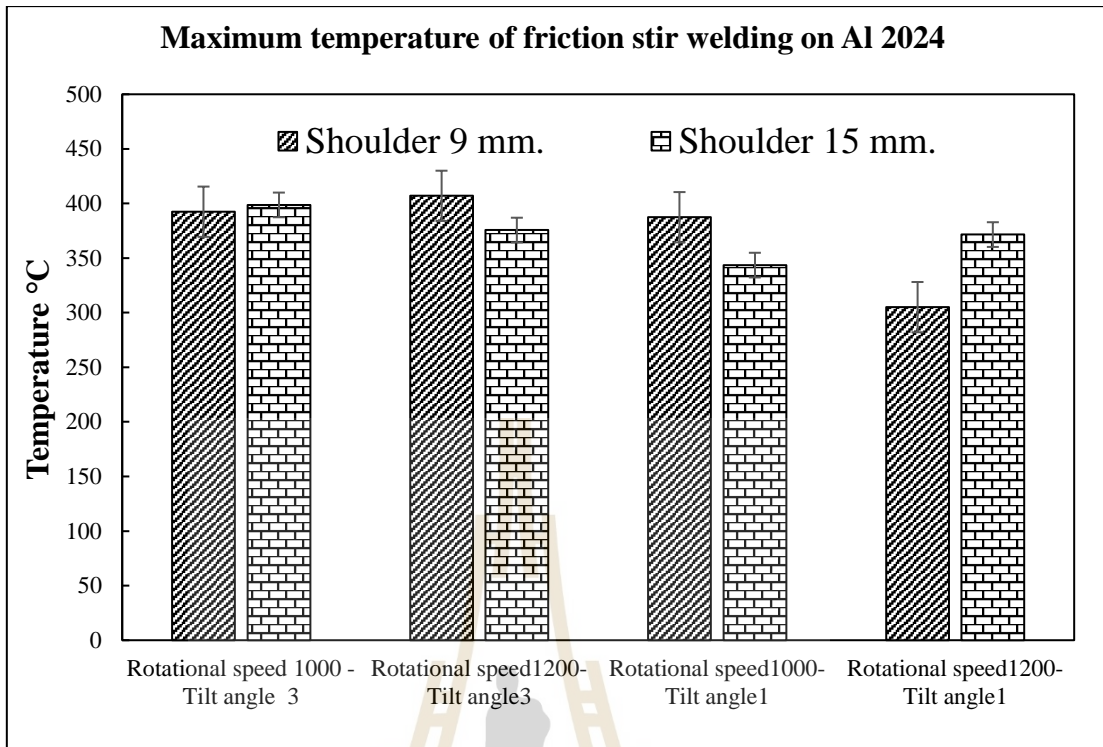
##### 4.4.1 อุณหภูมิกระบวนการเชื่อมในอะลูมิเนียม 2024

ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อกำหนดเวลาในการจุ่มเครื่องมือกวน และการจุ่มแช่ โดยภาพถ่ายความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียม 2024

| Factor                                   | Shoulder Pin 9 (mm.)                                                                | Shoulder Pin 15 (mm.)                                                                |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotational Speed-1000 RPM, Feed-30mm/Min |   |   |
| Rotational Speed-1200 RPM, Feed-30mm/Min |  |  |

อุณหภูมิการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024 นั้นพบว่าอุณหภูมิเกิดขึ้นสูงในช่วงเดินเชื่อม คือ 350 - 380 องศาเซลเซียส และพบว่าอุณหภูมิสูงสุดในการเชื่อมแต่ละตัวแปรที่มีค่าต่างกัน ข้อมูลสูงสุดของอุณหภูมิแต่ละตัวแปรแสดงดังรูปที่ 4.17

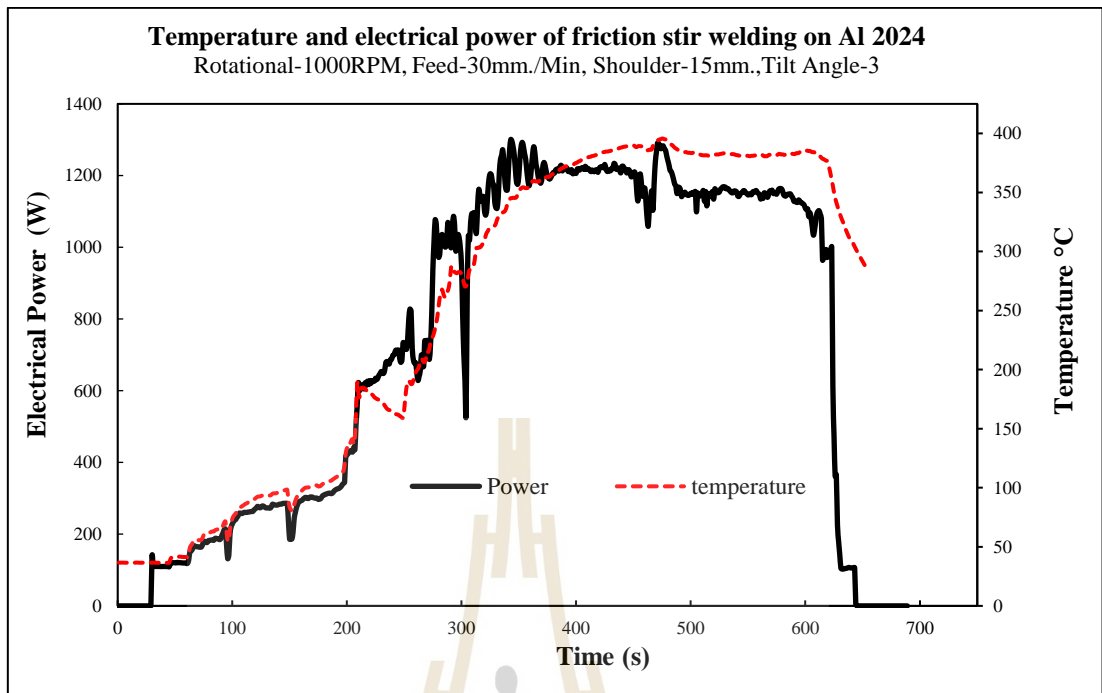


รูปที่ 4.17 อุณหภูมิสูงสุดการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024

จากรูปที่ 4.17 พบว่าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ตัวแปรในการเชื่อมที่เกิดอุณหภูมิสูงสุด 407 องศาเซลเซียส คือตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน 1,200 รอบต่อนาที และใช้มุมเอียง 3 องศา ส่วนตัวแปรที่เกิดอุณหภูมิต่ำสุด 310 องศาเซลเซียส คือตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน 1,200 รอบต่อนาที และใช้มุมเอียง 1 องศา บ่าของเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่ามุมเอียงของเครื่องมือกวน 1 องศา มีการสลิประหว่างเครื่องมือกวนกับชิ้นงานอะลูมิเนียมจึงทำให้เกิดอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นมุมเอียงของเครื่องมือกวนส่งผลต่อการเกิดความร้อนในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

#### 4.4.2 อุณหภูมิและกำลังไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024

จากวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร พบว่าในการสร้างความร้อนขึ้นกับตัวแปรขนาดบ่าของเครื่องมือกวน โดยมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และระยะเวลาที่ใช้ไป ในกระบวนการเชื่อม ดังนี้

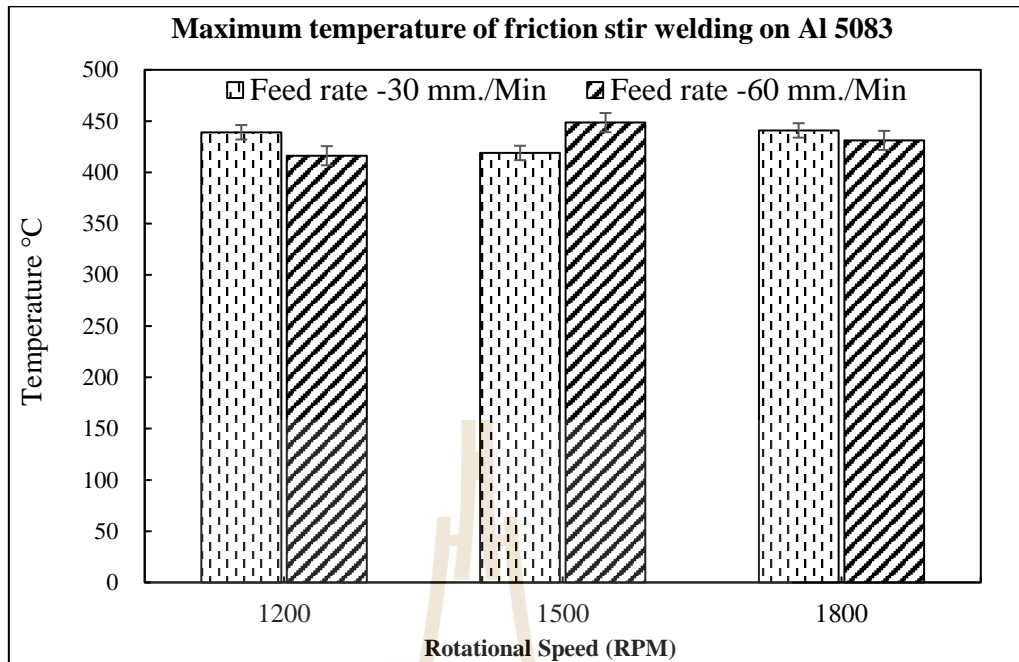


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของชุดสปินเดิล และอุณหภูมิในการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที ขนาดปากของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา

จากรูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น แปรผันตามการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวนอุณหภูมิจึงแปรผันตามกำลังไฟฟ้า สรุปกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรสูญเสียไปเพื่อให้เกิดความร้อนในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

#### 4.4.3 อุณหภูมิกระบวนการเชื่อมในอะลูมิเนียม 5083

ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ได้ทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อกำหนดเวลาในการจุ่ม และทำการจุ่มแช่ อุณหภูมิในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083 นั้นพบว่าเกิดขึ้นในช่วงเดินเชื่อม คือ 416 - 440 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.19

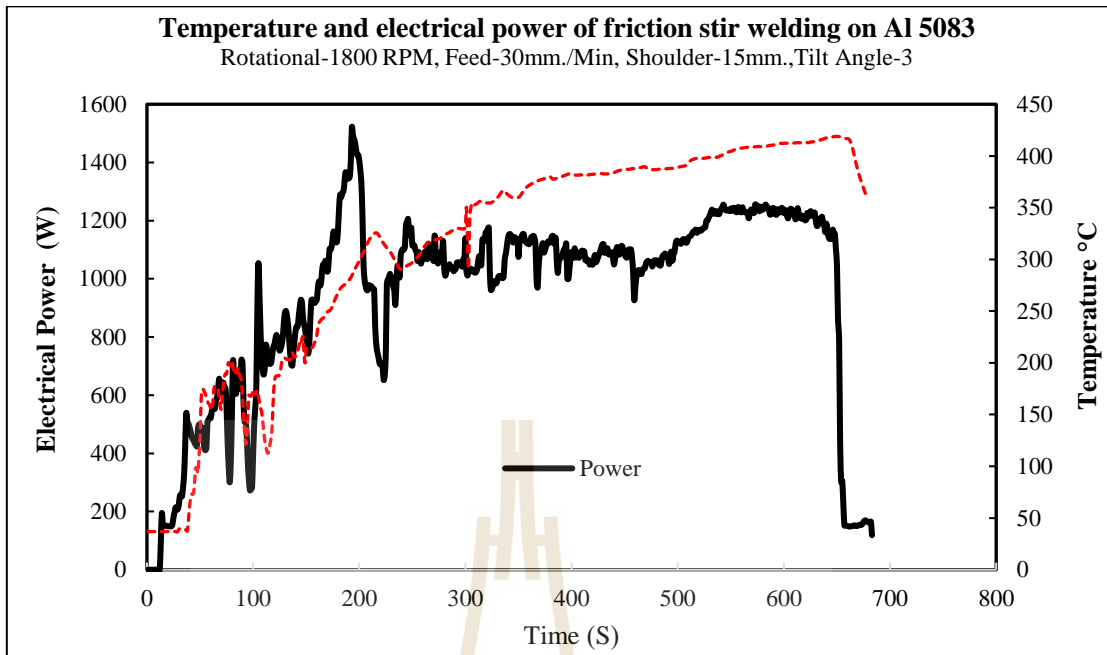


รูปที่ 4.19 อุณหภูมิสูงสุดการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083

จากรูปที่ 4.19 พบว่าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083 ตัวแปรที่เกิดอุณหภูมิสูงที่สุดคือตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน 1,500 รอบต่อนาที ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนตัวแปรที่เกิดอุณหภูมิต่ำที่สุดคือตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน 1,200 รอบต่อนาที ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที สรุปได้ว่าในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกัน

#### 4.4.4 อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอะลูมิเนียม 5083

จากวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิในการบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร โดยจากผลการเชื่อม 2024 พบว่าในการสร้างความร้อนขึ้นกับตัวแปรป่าของเครื่องมือกวน และมุมเอียงของเครื่องมือกวน แต่การทดลองโดยการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ใช้ขนาดป่าของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตรและมุมเอียง 3 องศา ทุกตัวแปรโดยมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม แสดงดังนี้



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของชุดสปินเดิล และอุณหภูมิในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ที่ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที แปรผันตามการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน ความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแปรผันตามการเกิดกำลังไฟฟ้า สรุปได้ว่ากำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเครื่องจักร มีการสูญเสียไปเพื่อให้เกิดความร้อนในการเชื่อม

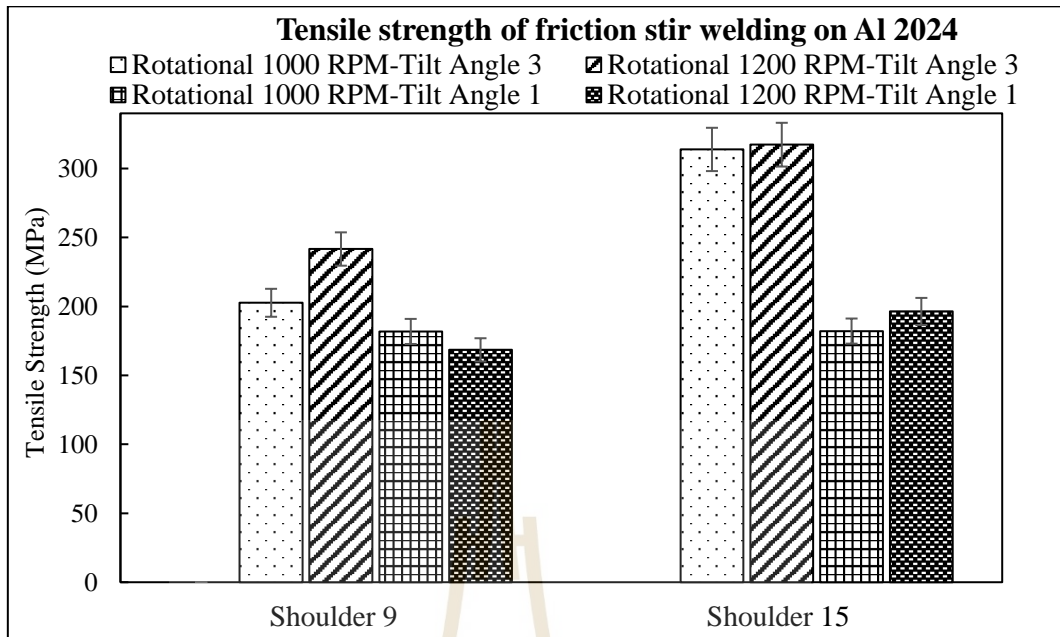
#### 4.5 สมบัติทางกลของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องจักรนั้น ได้นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมทดสอบแรงดึง และทดสอบค่าความแข็งแนวเชื่อม ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 ค่าความต้านทานแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

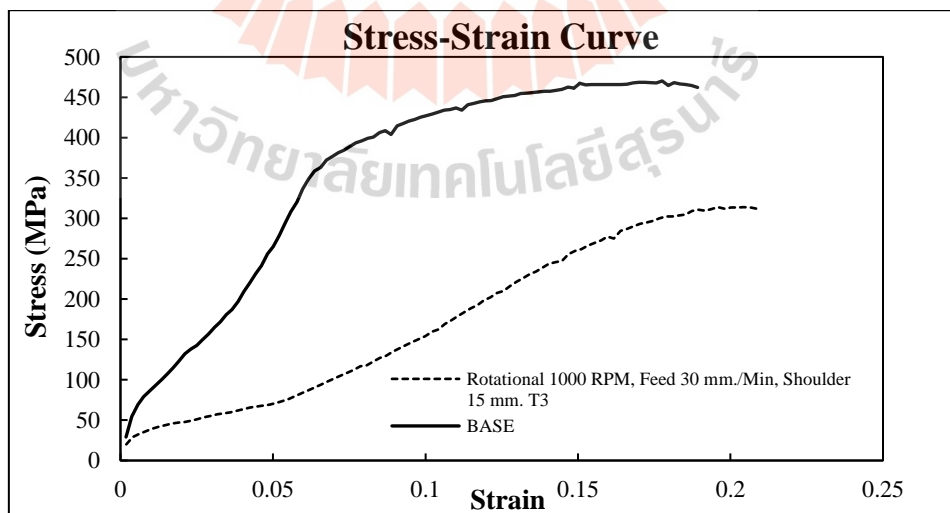
จากการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024 ตามตัวแปรที่กำหนด นั้น ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงพบว่า ตัวแปรขนาดบ่าของเครื่องมือกวน ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน และมุมเอียงของเครื่องมือกวน มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงโดยทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของแต่ละตัวแปร แสดงดังรูปที่ 4.21





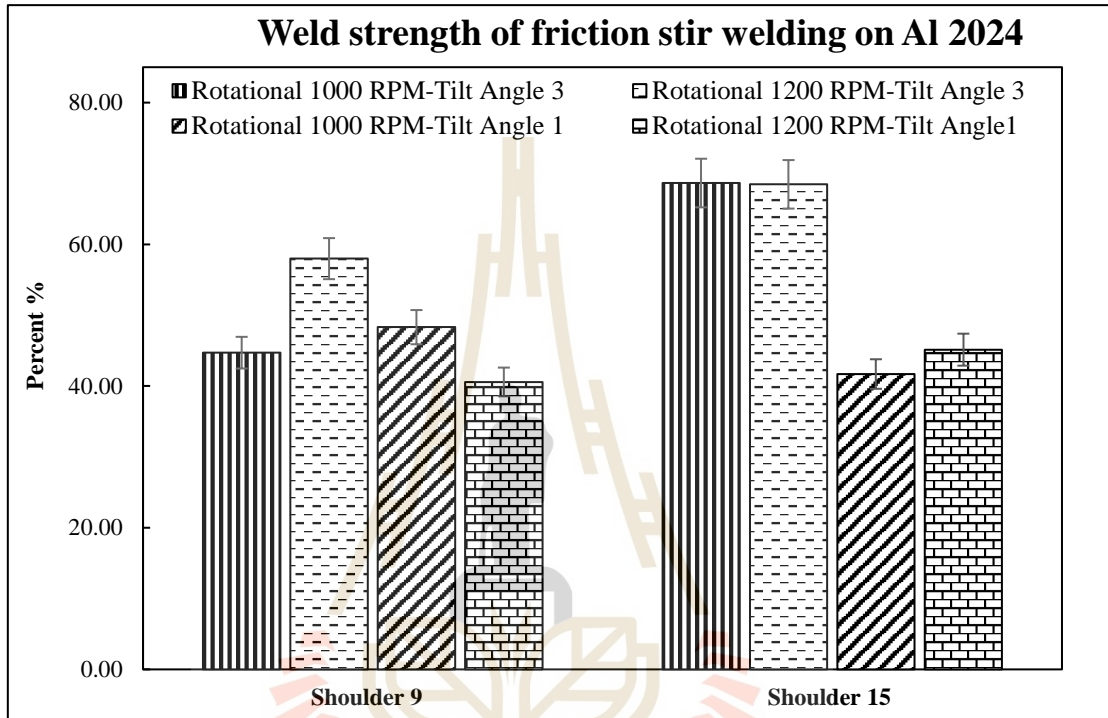
รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงคือ 317.29 MPa ในการเชื่อมตัวแปรที่ความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน 1,000 รอบต่อนาที ขนาดปากของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น Stress และความเครียด Strain ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

จากรูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่มีความแข็งแรงถึงมากที่สุด โดยใช้ขนาดบ่าของเครื่องมือกวาน 15 มิลลิเมตร ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวาน 1,000 รอบต่อนาที มุมเอียงของเครื่องมือกวาน 3 องศา แนวเชื่อมมีความเหนียวมากกว่าวัสดุเดิม และมีจุด Yield Point 300.60 MPa

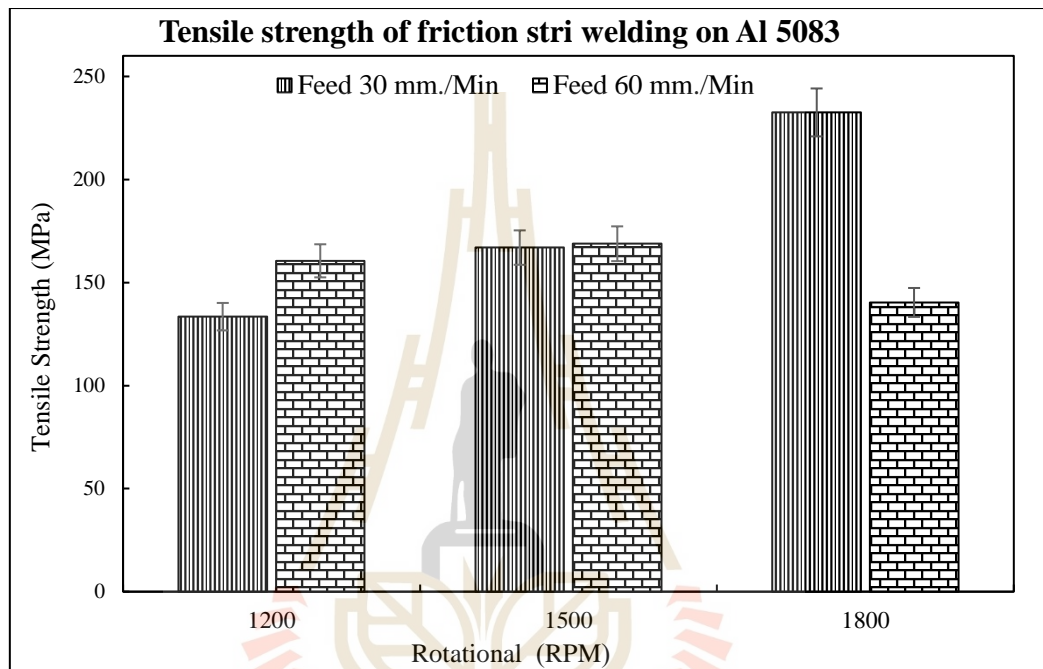


รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงของแนวเชื่อม

จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงกับชิ้นงานวัสดุเดิม เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเชื่อมพบว่า การเชื่อมที่ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวาน 1,000 รอบต่อนาที ขนาดบ่าเครื่องมือกวาน 15 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือกวาน 3 องศา ให้ค่าความแข็งแรงถึงมากที่สุดอยู่ที่ 68.65 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวาน 1,200 รอบต่อนาที ขนาดบ่าเครื่องมือกวาน 9 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือกวาน 1 องศา ให้ค่าความแข็งแรงถึงน้อยที่สุดคือ คิดเป็น 40.57 เปอร์เซ็นต์ โดยสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (Huijie Liu, 2012) ที่ทำการทดลองในวัสดุอะลูมิเนียม 2000 กล่าวว่าในการเชื่อมเสียดทานแบบกวาน วัสดุมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 60 – 90 เปอร์เซ็นต์ จากวัสดุเดิม

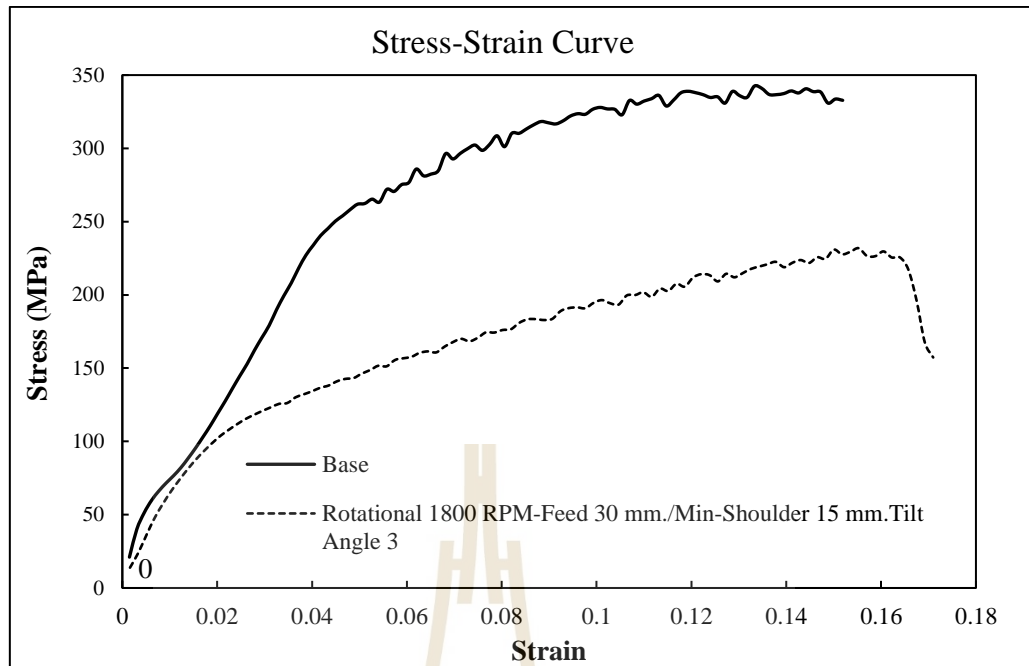
#### 4.5.2 ค่าความต้านทานแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

จากการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอะลูมิเนียม 5083 นั้น พบว่าตัวแปรความเร็วหมุนของเครื่องมือกวน 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด ส่วนตัวแปรที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดคือ ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน 1,200 รอบต่อนาที ทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งแรงดึงของการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอะลูมิเนียม 5083

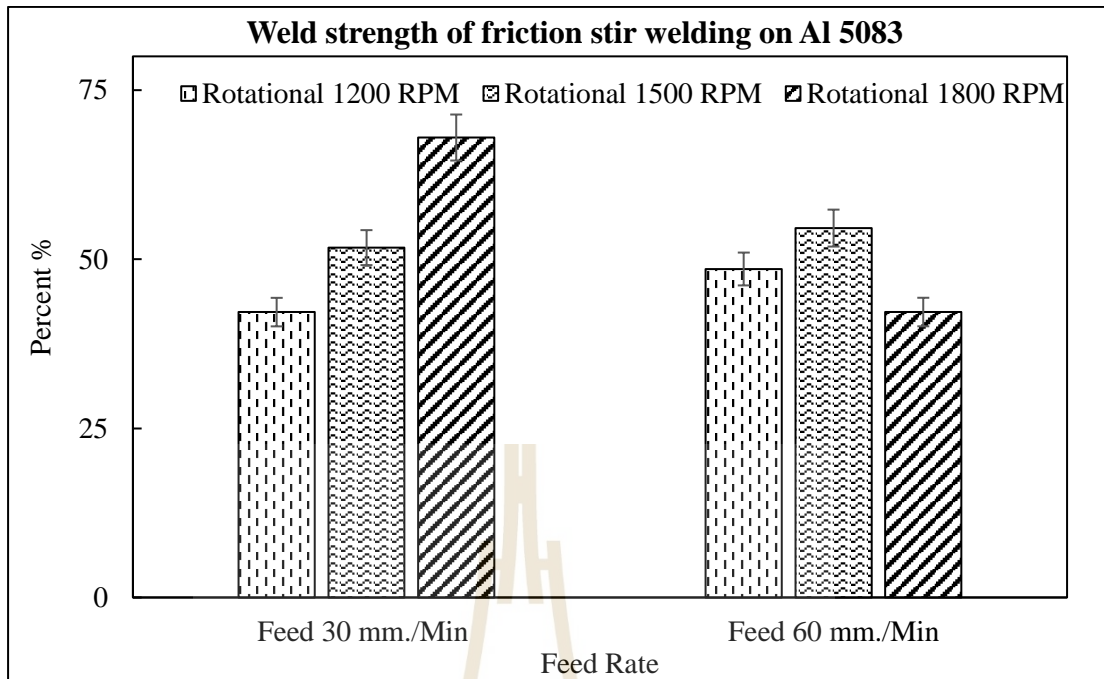
จากรูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าในการใช้ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกวน 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด 224.41 MPa และชิ้นงานที่มีความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดคือ 133.44 MPa โดยใช้ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที โดยใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงดึงลดลง สรุปได้ว่าความเร็วในการเดินเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น Stress และความเครียด Strain การเชื่อมโดยใช้ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวาน 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.25 พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 5083 โดยใช้ขนาดบ่าของเครื่องมือกวาน 15 มิลลิเมตร ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวาน 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าความเหนียวของวัสดุเพิ่มขึ้นจากวัสดุเดิม

จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดิ่งกับชิ้นงานวัสดุเดิม พบว่าการเชื่อมที่ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวาน 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดิ่งมากที่สุดอยู่ที่ 68 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวาน 1,200 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดิ่งน้อยที่สุดคือ คิดเป็น 42.19 เปอร์เซ็นต์ โดยรายงานวิจัยของ (Huijie Liu, 2012) กล่าวว่าในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนตัวแปรที่เหมาะสม วัสดุมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 60 – 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงของแนวเชื่อม ในอะลูมิเนียม 5083

#### 4.5.3 โครงสร้างมหภาคงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอะลูมิเนียม 2024

จากการทดลองผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคของเนื้อวัสดุในรอบเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยโครงสร้างมหภาคในชิ้นงานแสดงดังนี้

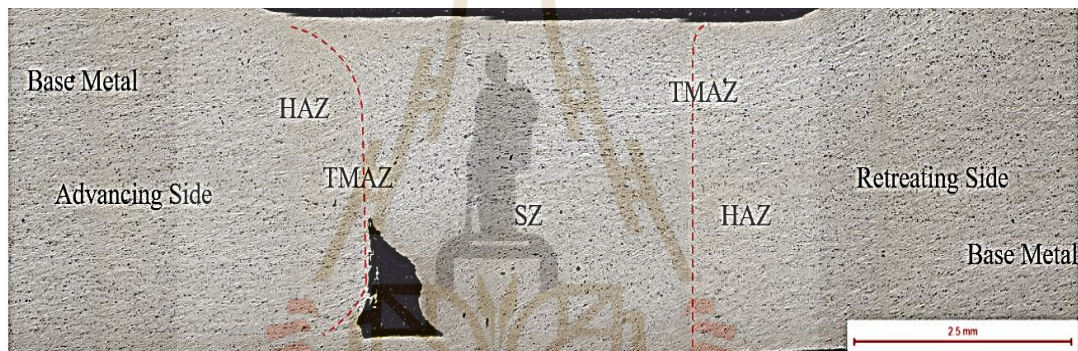


รูปที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024

โดยใช้ปากเครื่องมือกวนขนาด 15 มิลลิเมตร



จากรูปที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้บ่าเครื่องมือกวนขนาด 15 มิลลิเมตร พบจากโครงสร้างมหภาคที่แสดงให้เห็นพื้นที่ต่างๆ ของรอยเชื่อม คือ บริเวณพื้นที่กวน (Stir Zone: SZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากทางกล (Thermo-Mechanical Affected Zone: TMAZ) บริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และบริเวณพื้นที่ของวัสดุเดิม (Base Metal: BM) และในรูปภาพแสดงรูปที่เป็นจุดตำหนิที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในบริเวณพื้นที่ TMAZ และสังเกตได้ว่าเนื้อวัสดุที่ถูกกวนบริเวณพื้นที่กวน (Stir Zone: SZ) มีลักษณะเกรนละเอียดมากกว่าเนื้อวัสดุเดิม จากรูปภาพสรุปได้ว่าผล โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีความสอดคล้องกลับงานวิจัยของ (A. Abdollahzadeh, 2019; Mouloud Aissani, 2010; วรพงศ บุญช่วยแทน, 2560) ที่ทำการศึกษาสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม



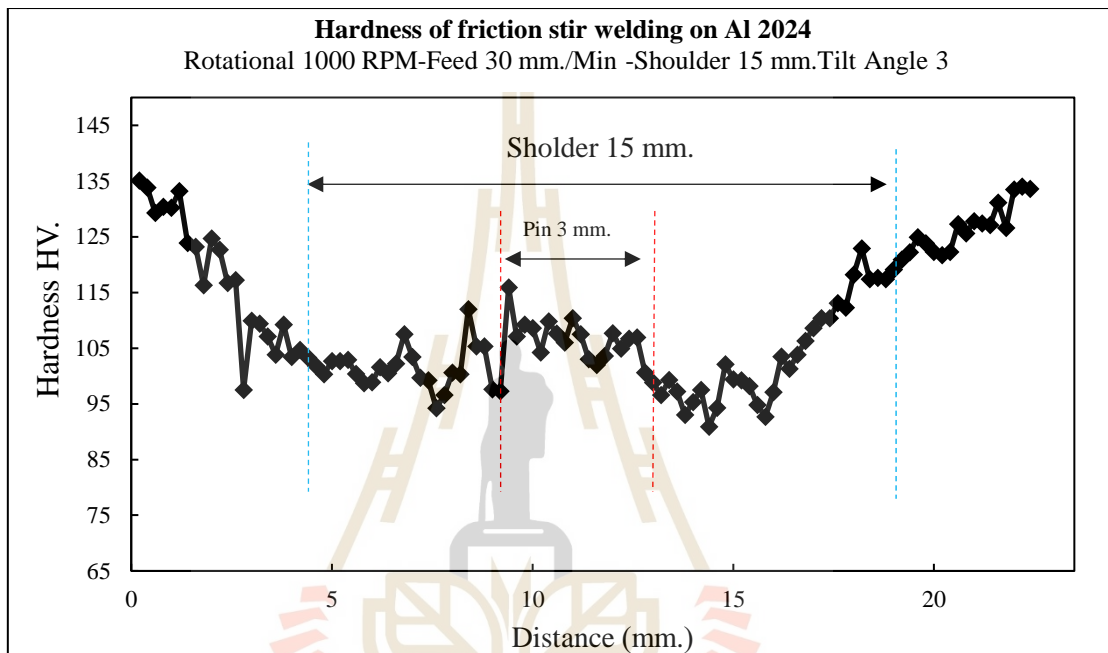
รูปที่ 4.28 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมในอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้บ่าเครื่องมือกวนขนาด 9 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.28 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม โดยใช้บ่าเครื่องมือกวนขนาด 9 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นพื้นที่ต่าง ๆ ของรอยเชื่อม เหมือนการเชื่อมโดยใช้บ่าเครื่องมือกวนขนาด 15 มิลลิเมตร คือ บริเวณพื้นที่กวน (Stir Zone: SZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากทางกล (Thermo-Mechanical Affected Zone: TMAZ) บริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และบริเวณพื้นที่ของวัสดุเดิม (Base Metal: BM) และในรูปภาพแสดงรูปจุดตำหนิที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนบริเวณ TMAZ ซึ่งเป็นรอยตำหนิที่มีขนาดใหญ่ และสังเกตได้ว่าเนื้อวัสดุที่ถูกกวนบริเวณพื้นที่กวน (Stir Zone: SZ) มีลักษณะเกรนละเอียดมากกว่าเนื้อวัสดุเดิม BM จากรูปภาพสรุปได้ว่า ผลเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้บ่าเครื่องมือกวนขนาด 9 มิลลิเมตร มีความสอดคล้องกลับงานวิจัยของ (A. Abdollahzadeh, 2019; Mouloud Aissani, 2010; วรพงศ บุญช่วยแทน, 2560)



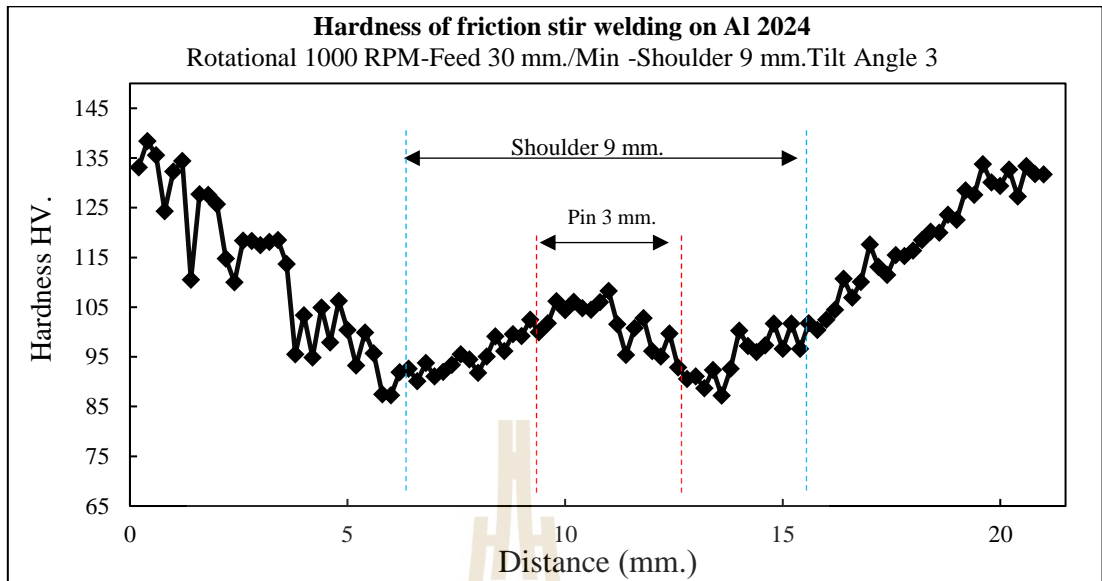
#### 4.5.4 ค่าความแข็งของแนวเชื่อม ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

ค่าความแข็งของรอยเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้เครื่องวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ทำการวัดความแข็งของชิ้นงานผ่ากลางแนวเชื่อม ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้ขนาดปากของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร และ 9 มิลลิเมตร แสดงดังนี้



รูปที่ 4.29 ความแข็งของแนวเชื่อมในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 โดยใช้เครื่องมือกวนขนาดปาก 15 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.29 ความแข็งของแนวเชื่อม โดยใช้เครื่องมือกวนปาก 15 มิลลิเมตร พบว่าความแข็งบริเวณพื้นที่กวน SZ มีค่าเฉลี่ย 114 HV. และค่าความแข็งค่อยๆลดลงในบริเวณผลกระทบทางกล TMAZ จนถึงบริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อน HAZ และค่าความแข็งของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นในบริเวณระหว่างผลกระทบทางความร้อนกับเนื้อวัสดุเดิมซึ่งเนื้อวัสดุเดิมมีค่าความแข็ง 135 HV.



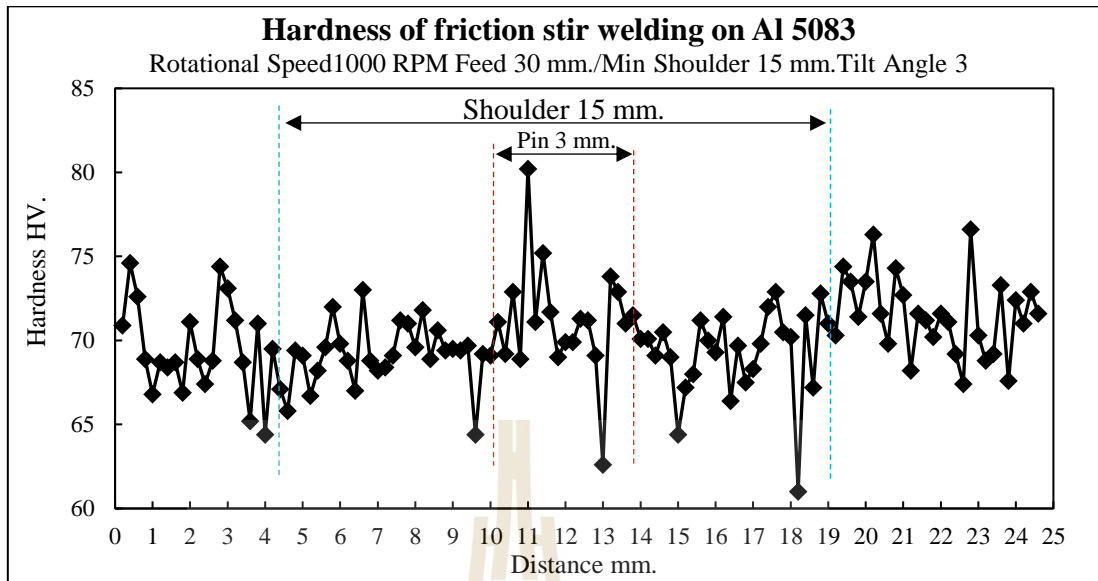
รูปที่ 4.30 ความแข็งของแนวเชื่อมในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024  
โดยใช้เครื่องมือกวนขนาดบ่า 9 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.30 ความแข็งของแนวเชื่อมโดยใช้เครื่องมือกวนบ่า 9 มิลลิเมตร พบว่าความแข็งบริเวณพื้นที่กวน SZ มีค่าเฉลี่ย 106 HV. และค่าความแข็งค่อยๆลดลงในบริเวณผลกระทบทางกล TMAZ จนถึงบริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อน HAZ และค่าความแข็งของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นในบริเวณระหว่างผลกระทบทางความร้อนกับเนื้อวัสดุเดิมซึ่งเนื้อวัสดุเดิมมีค่าความแข็ง 135 HV.

สรุปค่าความแข็งของแนวเชื่อมในอะลูมิเนียม 2024 มีค่าเฉลี่ย 106 HV. และค่อยๆลดลงในบริเวณผลกระทบทางกล TMAZ จนถึงบริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อน HAZ ค่าความแข็งของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นในบริเวณระหว่างผลกระทบทางความร้อนกับเนื้อวัสดุเดิมซึ่งเนื้อวัสดุเดิมมีค่าความแข็ง 135 HV.

#### 4.5.5 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

ค่าความแข็งของรอยเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 โดยใช้เครื่องวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ทำการวัดความแข็งของชิ้นงานผ่ากลางแนวเชื่อม ค่าความแข็งของแนวเชื่อมความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้เครื่องมือกวนบ่า 15 มิลลิเมตร พบว่าความแข็งบริเวณพื้นที่กวน SZ มีค่าเฉลี่ย 72.5 HV. และค่าความแข็งค่อยๆลดลงในบริเวณผลกระทบทางกล TMAZ จนถึงบริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อน HAZ บริเวณระหว่างผลกระทบทางความร้อนกับเนื้อวัสดุเดิมซึ่งเนื้อวัสดุเดิมมีค่าความแข็ง 75 HV. แสดงดังรูปที่ 4.30

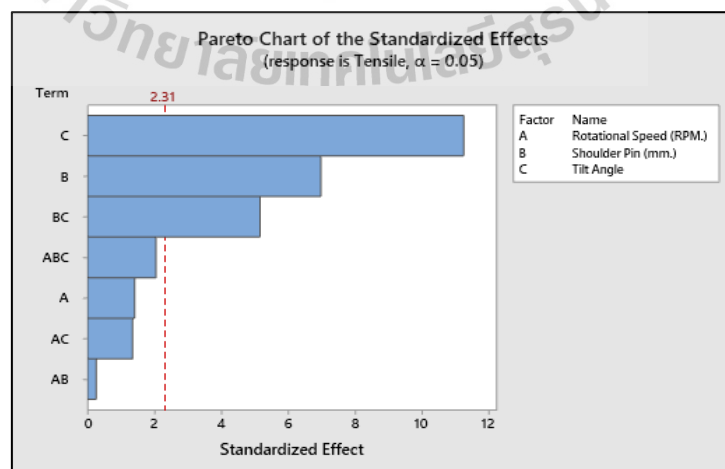


รูปที่ 4.31 ความแข็งของแนวเชื่อม โดยใช้เครื่องมือกวานป่า 15 มิลลิเมตร

#### 4.6 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

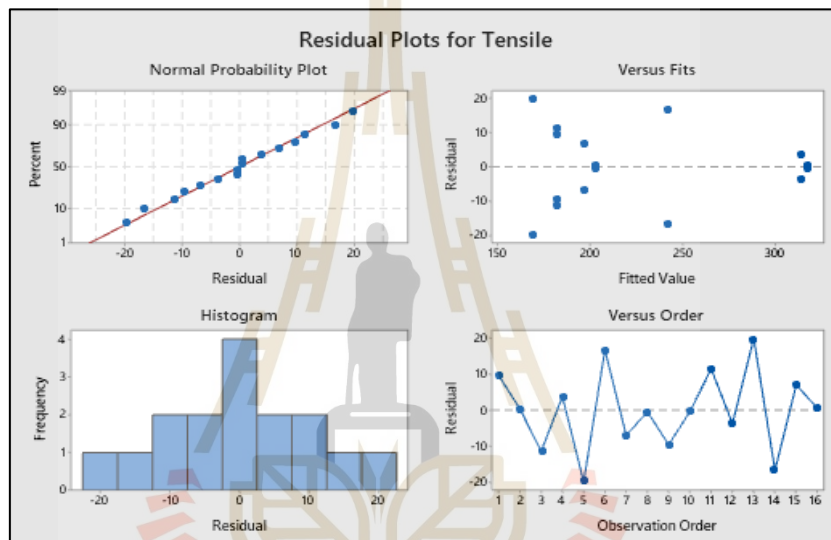
##### 4.6.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอะลูมิเนียม 2024

จากผลการทดลอง และได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรงดึง โดยใช้โปรแกรม Minitab 19 พบว่าตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุดคือ มุมเอียงของเครื่องมือกวาน รองลงมาคือขนาดป่าของเครื่องมือกวานและอิทธิพลร่วมระหว่างมุมเอียงของเครื่องมือกวาน รองลงมาคือขนาดป่าของเครื่องมือกวาน แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟพาเรโตผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ในอะลูมิเนียม 2024

จากอิทธิพลหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมคือ มุมเอียงของเครื่องมือกวาน โดยมีผลกระทบเชิงบวกเมื่อเอียงเครื่องเมื่อกวานมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ขนาดบ่าของเครื่องมือกวานมีอิทธิพลเชิงบวกคือเมื่อบ่าของเครื่องมือกวานมีขนาดใหญ่ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น และจากกราฟการกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การแบ่งอันตรภาคชั้นของฮิสโตแกรมเป็นแบบระฆังคว่ำหมายถึงข้อมูลมีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง ค่า Versus Order ของข้อมูลพบว่าการผันแปรทั้งบวกและลบทำให้ข้อจึงไม่สามารถคาดเดาผลได้ ทำให้ข้อมูลเหมาะสมในการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.33 ลักษณะของข้อมูลในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากอิทธิพลร่วมของตัวแปรพบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างขนาดบ่าของเครื่องมือกวานและมุมเอียงของเครื่องมือกวานมีผลต่อสมบัติค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด

ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

| Source                  | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-Value | P-Value |
|-------------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model                   | 7  | 49791.3 | 7113.0  | 29.92   | 0.000   |
| Linear                  | 3  | 42046.3 | 14015.4 | 58.96   | 0.000   |
| Rotational Speed (RPM.) | 1  | 469.5   | 469.5   | 1.98    | 0.198   |
| Shoulder Pin (mm.)      | 1  | 11551.5 | 11551.5 | 48.60   | 0.000   |
| Tilt Angle              | 1  | 30025.4 | 30025.4 | 126.32  | 0.000   |

ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024 (ต่อ)

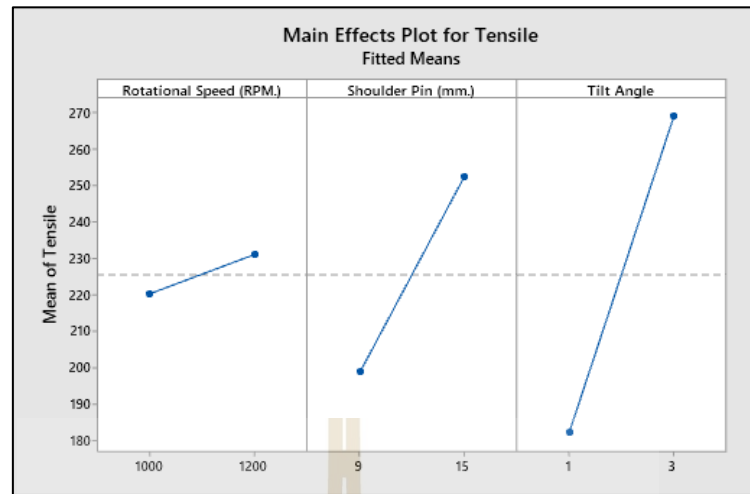
| Source                                                  | DF | Adj SS  | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---------------------------------------------------------|----|---------|--------|---------|---------|
| 2-Way Interactions                                      | 3  | 6748.8  | 2249.6 | 9.46    | 0.005   |
| Rotational Speed (RPM.) *Shoulder Pin (mm.)             | 1  | 15.8    | 15.8   | 0.07    | 0.803   |
| Rotational Speed (RPM.) *Tilt Angle                     | 1  | 431.8   | 431.8  | 1.82    | 0.215   |
| Shoulder Pin (mm.) *Tilt Angle                          | 1  | 6301.1  | 6301.1 | 26.51   | 0.001   |
| 3-Way Interactions                                      | 1  | 996.1   | 996.1  | 4.19    | 0.075   |
| Rotational Speed (RPM.) *Shoulder Pin (mm.) *Tilt Angle | 1  | 996.1   | 996.1  | 4.19    | 0.075   |
| Error                                                   | 8  | 1901.6  | 237.7  |         |         |
| Total                                                   | 15 | 51692.8 |        |         |         |

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

| Model Summary | S       | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---------------|---------|--------|-----------|------------|
|               | 15.4175 | 96.32% | 93.10%    | 85.29%     |

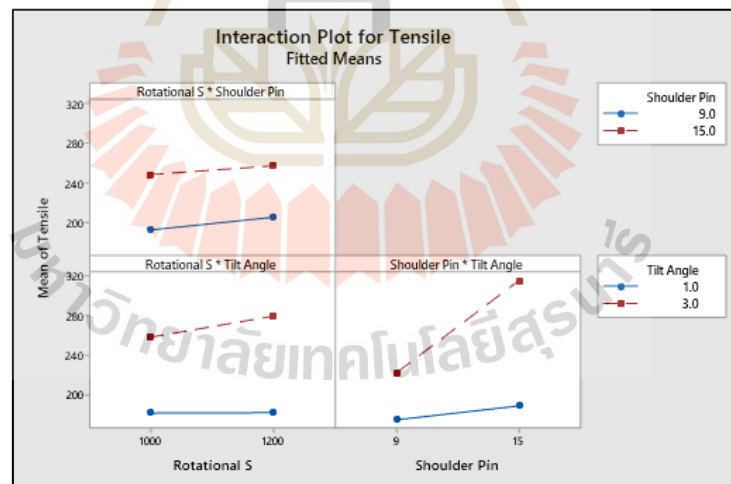
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น ค่า R-sq มีค่าเท่ากับ 96.32 เปอร์เซ็นต์ ค่า R-sq (adj) เท่ากับ 93.10 เปอร์เซ็นต์ ถือเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ  $\alpha = 0.05$  และทำให้ข้อมูลเพียงพอต่อการนำไปการพยากรณ์ต่อไป

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ มุมเอียงของเครื่องมือกลึง และขนาดบ่าของเครื่องมือกลึง ดังนั้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เมื่อเอียงเครื่องมือมากขึ้นทำให้ระยะกดสัมผัสของบ่าเครื่องมือกลึงในเนื้อวัสดุมากขึ้น เนื้อวัสดุถูกกดให้กวนเข้ากัน จึงส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับคำกล่าวของ (Majid Elyasi, 2016) ขนาดบ่าของเครื่องมือกลึงส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเพราะเมื่อใช้ขนาดบ่าของเครื่องมือกลึงที่ใหญ่ขึ้นจาก 9 มิลลิเมตร เป็น 15 มิลลิเมตร ทำให้เพิ่มพื้นที่ในการสร้างความร้อนที่เหมาะสมต่อการกวนเนื้อโลหะ สอดคล้องกับคำกล่าวของ (A. Arora, 2011) อิทธิพลขนาดบ่าของเครื่องมือกลึงส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมแสดงดัง รูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 อิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากและอิทธิพลร่วมของตัวแปรพบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างขนาดปากของเครื่องมือกวนและมุมเอียงของเครื่องมือกวนมีผลต่อสมบัติค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด



รูปที่ 4.35 อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากรูปที่ 4.35 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวนและขนาดปากของเครื่องมือกวน พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ตัวแปรที่ใช้ขนาดปากของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร แนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าขนาดปากของเครื่องมือกวน 9



มิลลิเมตรและเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 1,200 รอบต่อนาที ค่าความแข็งแรงจึงเพิ่มขึ้น

อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวนและมุมเอียงของเครื่องมือกวน พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที โดยใช้มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา แนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่ามุมเอียง 1 องศา

อิทธิพลร่วมระหว่างและขนาดบ่าของเครื่องมือกวน พบว่าเมื่อใช้ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา แนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่ามุมเอียง 1 องศา และเมื่อเพิ่มขนาดบ่าของเครื่องมือกวน เป็น 15 มิลลิเมตร มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา แนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.6.2 สมการพยากรณ์

จากวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ ทำการเขียนสมการพยากรณ์ สำหรับทำนายผลค่าความแข็งแรงดึง จากตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ดังนี้

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ค่าความแข็งแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

| Term                          | Coef   | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF  |
|-------------------------------|--------|---------|---------|---------|------|
| Constant                      | 225.53 | 4.46    | 50.60   | 0.000   |      |
| Shoulder (mm.)                | -26.87 | 4.46    | -6.03   | 0.000   | 1.00 |
| Tilt Angle                    | -43.32 | 4.46    | -9.72   | 0.000   | 1.00 |
| Shoulder (9mm.) *Tilt Angle 1 | 19.84  | 4.46    | 4.45    | 0.001   | 1.00 |

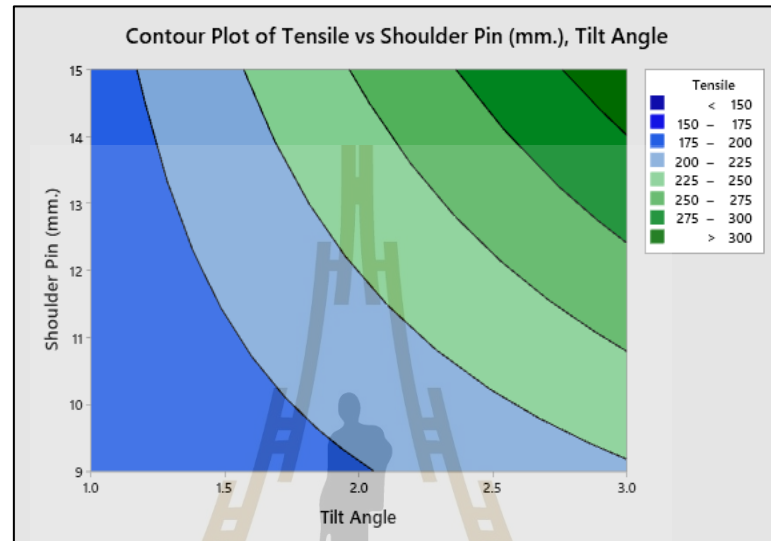
#### Regression Equation

ค่าความแข็งแรงดึง = 225.53 - 26.87 Shoulder(9mm.) + 26.87 Shoulder (15mm.) - 43.32 Tilt Angle\_1 + 43.32 Tilt Angle\_3 + 19.84 Shoulder (9 mm.) \*Tilt Angle\_1 - 19.84 Shoulder (9mm.) \*Tilt Angle\_3 - 19.84 Shoulder (15mm.) \*Tilt Angle\_1 + 19.84 Shoulder (15mm.) \*Tilt Angle\_3

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ การพยากรณ์ค่าความแข็งแรงดึง

| Model Summary | S       | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---------------|---------|--------|-----------|------------|
|               | 17.8299 | 92.62% | 90.78%    | 86.88%     |

จากการสมการพยากรณ์ สำหรับทำนายผลค่าความแข็งแรงดึงนั้นพบว่า ค่า R-sq มีค่าเท่ากับ 92.62 เปอร์เซ็นต์ ค่า R-sq(adj) เท่ากับ 90.78 เปอร์เซ็นต์ ถือเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ  $\alpha = 0.05$  ทำให้ข้อมูลเหมาะสมต่อการนำไปการพยากรณ์

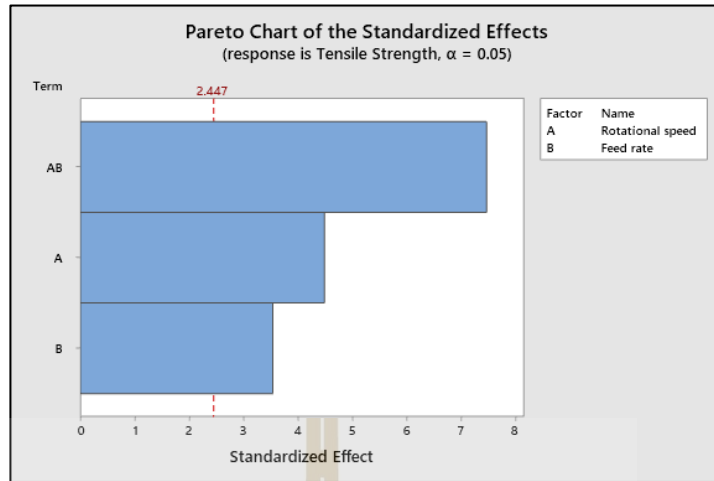


รูปที่ 4.36 อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 2024

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่องมือกลึง และขนาดปากของเครื่องมือกลึง พบว่าหากต้องการผลค่าความแข็งแรงดึงในงานเชื่อมที่แข็งแรงที่สุด ให้ใช้มุมเอียงของเครื่องมือกลึง 3 องศา และขนาดปากของเครื่องมือกลึง 15 มิลลิเมตรหรือ

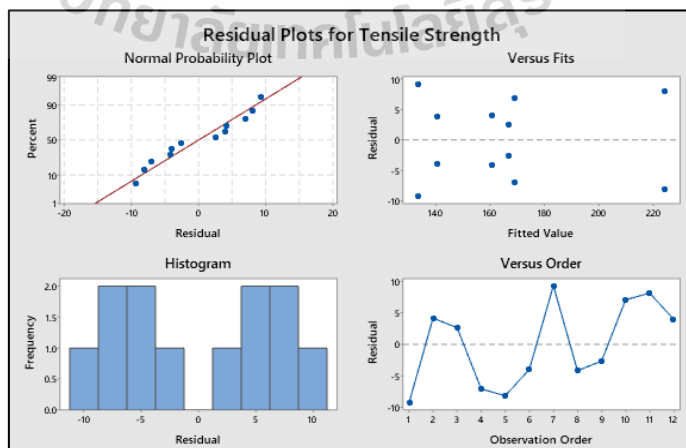
#### 4.6.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

จากผลการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 5083 และได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงโดยใช้โปรแกรม Minitab 19 พบว่าตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุดคือ อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกลึงกับความเร็วในการเดินเชื่อม ลงลงมาคือความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกลึง และความเร็วในการเดินเชื่อม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 กราฟพารโตผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียม 5083

จากอิทธิพลหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมคือ อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกับความเร็วในการเดินเชื่อม วิเคราะห์ได้ว่าตัวแปรที่มีผลเชิงบวก เมื่อความเร็วในการหมุนของเครื่องมือมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น และจากกราฟการกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การแบ่งอันตรภาคชั้นของฮิสโตแกรมเป็นแบบหัวหักแสดงให้เห็นว่าเกิดจากผลกระทบของตัวแปร ค่า Versus Order ของข้อมูลพบว่าการผันแปรทั้งบวกและลบทำให้ข้อจึงไม่สามารถคาดเดาผลได้ ทำให้ข้อมูลเหมาะสมในการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.38 ลักษณะของข้อมูลในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

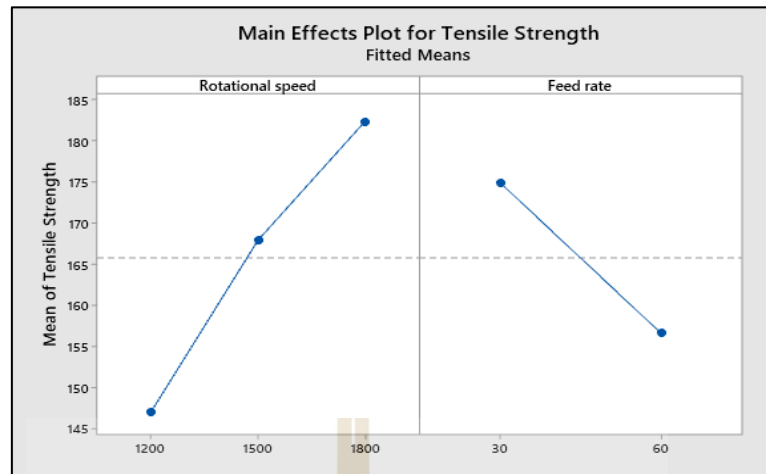
ตารางที่ 4.12 วิเคราะห์ความแปรปรวน ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

| Source                     | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-Value | P-Value |
|----------------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model                      | 5  | 10337.1 | 2067.42 | 25.57   | 0.001   |
| Linear                     | 3  | 3543.8  | 1181.27 | 14.61   | 0.004   |
| Rotational speed           | 2  | 2532.2  | 1266.09 | 15.66   | 0.004   |
| Feed rate                  | 1  | 1011.6  | 1011.64 | 12.51   | 0.012   |
| 2-Way Interactions         | 2  | 6793.3  | 3396.64 | 42.01   | 0.000   |
| Rotational speed*Feed rate | 2  | 6793.3  | 3396.64 | 42.01   | 0.000   |
| Error                      | 6  | 485.1   | 80.85   |         |         |
| Total                      | 11 | 10822.2 |         |         |         |

ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

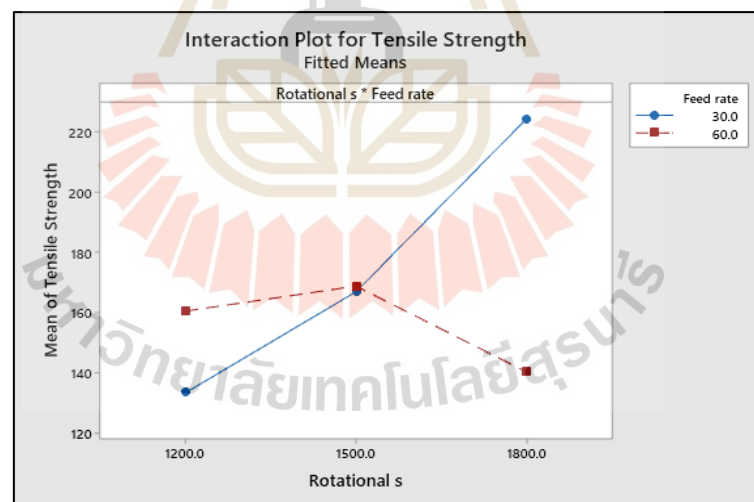
| Model Summary | S       | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---------------|---------|--------|-----------|------------|
|               | 8.99172 | 95.52% | 91.78%    | 82.07%     |

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น ค่า R-sq มีค่าเท่ากับ 95.52 เปอร์เซ็นต์ ค่า R-sq(adj) เท่ากับ 91.78 เปอร์เซ็นต์ ถือเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ  $\alpha = 0.05$  ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง คือ ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือ ความเร็วในการเดินเชื่อม สอดคล้องกับคำกล่าวของ (A. Abdollahzadeh, 2019) ทำให้เกิดการสร้างความร้อนที่เหมาะสมต่อการกวนเนื้อ โลหะ โดยอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 อิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากรูปที่ 4.39 พบว่าเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น และตัวแปรความเร็วในการเดินเชื่อมพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมค่าความแข็งแรงลดลง

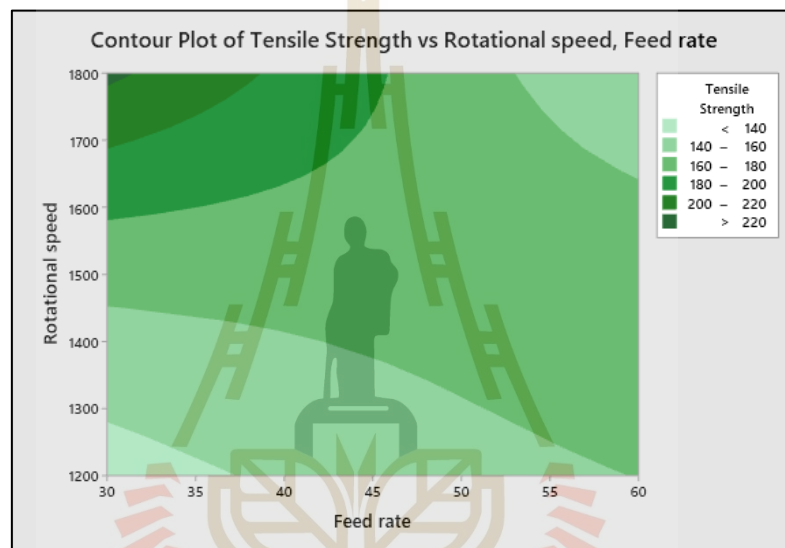


รูปที่ 4.40 อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากรูปที่ 4.40 พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกลึง และความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที ตัวแปรที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่า

อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกล และความเร็วในการเดิน เชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ตัวแปรที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกัน

อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกล และความเร็วในการเดิน เชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที ตัวแปรที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงลดลง แต่ตัวแปรความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.41 อิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ในการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกล และความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่าหากต้องการผลค่าความแข็งแรงดึงในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่แข็งแรงที่สุด ให้ใช้ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกล 1,800 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที

#### สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนตัวแปรที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงในการเชื่อม อะลูมิเนียม 2024 คือ มุมเอียงของเครื่องมือกล และขนาดปากของเครื่องมือกล ผลจากมุมเอียงของเครื่องมือกล เมื่อมุมเอียงเครื่องมือกลมากขึ้นทำให้เกิดการกดกวนเนื้อวัสดุมากทำให้ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลง ดังนั้นหากมุมเอียงของเครื่องมือกลเหมาะสม จะเกิดความแข็งแรงของแนว



เชื่อมสูง อิทธิพลขนาดบ่าของเครื่องมือกวน พบว่าเครื่องมือกวนมีขนาดบ่ามากขึ้นทำให้เกิดความ  
พื้นที่การเสียดทานระหว่างเครื่องมือกวนกับวัสดุ ทำให้เกิดความร้อนที่เหมาะสมต่อการไหลตัวของ  
เนื้อวัสดุทำให้ค่าความแข็งแรงที่ดี

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนตัวแปรที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงในการเชื่อม  
อะลูมิเนียม 5083 คือ ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน และความเร็วในการเดินเชื่อม  
ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวนมีผลต่อการสร้างความร้อน ดังนั้นหากใช้ความเร็วรอบที่  
เหมาะสมจะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการเชื่อมที่ดี ความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่ามีผลต่อความ  
แข็งแรงของวัสดุ เช่นเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมความแข็งแรงของวัสดุลดลง



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษาผลกระทบของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนขนาดเล็กต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมนั้น เนื้อหาในบทนี้เป็นส่วนสรุปผลการวิจัย จากการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมผสม โดยสรุปผลการวิจัยดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากการออกแบบและสร้างเครื่องจักรสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น รายละเอียดและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรสรุปดังนี้

ประสิทธิภาพการเชื่อม : เครื่องจักรสามารถเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม 2024 และอะลูมิเนียม 5083 ได้ดี

การเคลื่อนที่ในแนวแกน X : ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน 150 มิลลิเมตร ความเร็วในการเคลื่อนที่สูงสุด 100 มิลลิเมตรต่อนาที ควบคุมการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ

การเคลื่อนที่ในแนวแกน Z : ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน 50 มิลลิเมตร ควบคุมการทำงานด้วยชุดมือหมุน

ความเร็วรอบสูงสุดของชุดสปินเดิล : 2,500 รอบต่อนาที

เครื่องจักรสามารถเชื่อมชิ้นงานอะลูมิเนียม 2014 และอะลูมิเนียม 5083 ผิวของแนวเชื่อมและประสิทธิภาพการเชื่อมแปรผันตามตัวแปรที่ทำการทดลอง สรุปได้ว่าเครื่องจักรทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ และเหมาะสมสำหรับเป็นต้นแบบในการศึกษาต่อไป

##### 5.1.2 กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้อะลูมิเนียมผสม 2024 และอะลูมิเนียม 5083 แนวโน้มกระแสไฟฟ้าในกระบวนการเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวน ในช่วงจุ่มเครื่องมือกวนลงในชิ้นงาน ช่วงจุ่มแช่เครื่องมือกวน และช่วงเดินเชื่อมส่งผลให้การใช้กำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นแปรผันตามกระบวนการดังกล่าวทั้ง 3 ช่วง จากผลการวิจัยพบว่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องจักรใช้ไปเปรียบเทียบกับขนาดปากของเครื่องมือกวน 9 มิลลิเมตรและ 15 มิลลิเมตร แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าชุดสปินเดิลของเครื่องจักร คิดเป็นร้อยละ 95 ส่วนการใช้พลังงาน

ไฟฟ้าของชุดแกน X คิดเป็นร้อยละ 5 ดังนั้นข้อสรุปด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า กล่าวได้ว่าหากเลือกใช้ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน และกำหนดช่วงเวลาในการเชื่อมที่เหมาะสม ส่งผลให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้

### 5.1.3 สมบัติทางกลของแนวเชื่อม

จากผลการวิจัยความแข็งแรงของแนวเชื่อมในอะลูมิเนียมผสม 2024 โดยใช้วิธีการทางสถิตินั้น สรุปตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดังอย่างมีนัยสำคัญคือ มุมเอียงของเครื่องมือกวน และขนาดบ่าของเครื่องมือกวน ตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดังอย่างมีนัยสำคัญ การเชื่อมในตัวแปรที่แข็งแรงที่สุด คือ ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวน 1,000 รอบต่อนาที มุมเอียงของเครื่องมือกวน 3 องศา และขนาดบ่าของเครื่องมือกวน 15 มิลลิเมตร ให้ค่าความต้านทานแรงดึง 318.61 MPa คิดเป็น 68 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุเดิม

จากผลการวิจัยความแข็งแรงของแนวเชื่อมในอะลูมิเนียมผสม 5083 โดยใช้วิธีการทางสถิตินั้น สรุปตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดังอย่างมีนัยสำคัญคือ ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือกวน และความเร็วในการเดินเชื่อม การเชื่อมในตัวแปรที่แข็งแรงที่สุด คือ ความเร็วรอบหมุนของเครื่องมือกวน 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 224.41 MPa คิดเป็น 68 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุเดิม

สรุปจากค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม หากเครื่องจักรต้นแบบทำการเชื่อมด้วยตัวแปรที่เหมาะสม ความแข็งแรงของแนวเชื่อมเกิดขึ้นสูงสุด 68 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น หากมีการเดินแนวเชื่อมที่เป็นเส้นโค้ง หรือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเดินเชื่อมกับขนาดบ่าของเครื่องมือกวน จะทำให้เพิ่มองค์ความรู้ และสามารถวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้อีกวิธี

## 5.3 การประยุกต์ในอนาคต

ในการออกแบบและสร้างเครื่องจักรสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น จากผลการวิจัยที่ผ่านมา สิ่งที่วิศวกร หรือผู้ออกแบบควรพิจารณาประกอบอันดับแรกคือ ความสามารถการรับภาระแรงกระทำของเครื่องจักร และประสิทธิภาพในการเชื่อมโดยวิเคราะห์ สมบัติทางกลของแนวเชื่อม เช่นค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็งแรง และส่วนประกอบทางโลหะวิทยาของแนว

เชื่อม จากนั้นองค์ประกอบที่ควรพิจารณาต่อมาคือ กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักร ดังนั้นสิ่งเหล่านี้ควรพิจารณาอย่างรอบคอบ จากผลการวิจัยทั้งหมดที่นำเสนอมานั้นสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเครื่องจักรถูกออกแบบเหมาะสม จะช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูง เกิดประโยชน์ และความคุ้มค่าในกระบวนการผลิต



## เอกสารอ้างอิง

- ปารเมศ ชุติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่ง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- วิรัช อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน, 2556. การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1. กรุงเทพฯ :บริษัทซี  
เอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
- วิชัย พุ่มจันทร์. 2556. อิทธิพลของการเอียงเครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่ออลูมิเนียม 6063  
และอลูมิเนียม 7075 วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 24 ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2556
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน, รอมฎอน บุระพา และวรรณพร ชีววุฒิพงศ. 2019. ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อม  
เสียดทานแบบกวนต่างความหนาของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิด ระหว่าง  
2024 กับ 7075. **Kasem Bundit Engineering Journal** Vol.9 No.3
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน, วรรณพร ชีววุฒิพงศ และรอมฎอน บุระพา. 2017. พฤติกรรมโครงสร้าง  
จุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของแผ่นอลูมิเนียมหล่อกิ่ง  
ของแข็งต่างชนิด ssm2024 และ ssm6061. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
ศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 12 ฉบับที่ 2
- ภัครดา แสนสุขสม และจกมล สังข์อ่วม, 2562. การประเมินความเสี่ยงอันตรายของฟุ้งโลหะใน  
กระบวนการเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อปฏิบัติงานของพนักงาน Risk assessment of worker  
exposure to metal fume produced in welding process. วารสารวิชาการสถาบัน  
เทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ.
- สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, วรพงศ์ บุญช่วยแทน, ชาตรี หอมเขียว และวรรณพร ชีววุฒิพงศ. 2015. อิทธิพล  
ของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง ssm 356 กับ  
7075. **Naresuan University Engineering Journal**. Vol.10, No.1: 21-30.
- A. Abdollahzadeh, A. Shokuhfar, J.M. Cabrera, A.P. Zhilyaev and H. Omidvar.  
2019. In-situ nanocomposite in friction stir welding of 6061-t6 aluminum  
alloy to az31 magnesium allo. **Journal of Materials Processing Tech.**  
Volume 263: 296-307.
- A. Arora, A. Deb and T. DebRoy. 2010. Toward optimum friction stir welding tool  
shoulder diameter. **sciencedirect journal scripta-materialia**. Volume 64,  
Pages 9-12.
- A.W. Orłowicz, M. Mroz, M. Tupaj AndA. Trytek. 2015. Materials used in the  
automotive industry **ARCHIVES OF FOUNDRY ENGINEERING** Volume  
15 Issue 2/2015: 75-78.

- Amber Shrivastava, Manuela Kronen and Frank E. Pfefferkorn 2015. Comparison of energy consumption and environmental impact of friction stir welding and gas metal arc welding for aluminum. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology** 9 159–168.
- B.T. Gibson, D.H. Lammlein, T.J. Prater, W.R. Longhurst, C.D. Cox, M.C. Ballun, K.J. Dharmaraj, G.E. Cook and A.M. Strauss. 2014. Friction stir welding: Process, automation, and control. **Journal of Manufacturing Processes** 16: 56-73.
- D. Trimble, G.E. O'Donnell and J. Monaghan. 2014. Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of aa2024-t3. **Journal of Manufacturing Processes** 17: 141–150.
- David M. Potter and Richard K. Hansen, United Launch Alliance. 2011. Friction stir welding apparatus **Patent No. US 7.866,532 B1 Date of Patent: Jan 11 2011.**
- Fumio Yoshinaga and Kudamatsu Assignee: Hitachi, Ltd, Tokyo (JP). 2004. Compound machining device and friction stir bonding method. **Patent No.: US 6,708,865 B2 Date of Patent: Mar 23 2004.**
- Gianluca Buffa, Giuseppe Ingarao, Davide Campanella, Rosa Di Lorenzo, Fabrizio Micari and Livan Fratini. 2018. An insight into the electrical energy demand of friction stir welding processes: The role of process parameters, material and machine tool architecture. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 100
- Greenpeace.org. 2018. “สถานการณ์มลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ใน 14 เมืองของประเทศไทย ปี พ.ศ.2560” data online 17/1/2021.
- H. Su, C.S. Wu, A. Pittner and M. Rethmeier. 2013. Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and axial force in friction stir welding. **Journal of Manufacturing Processes**. Volume 15: 495-500.
- Huijie Liu, Huijie Zhang, Qing Pan and Lei Yu. 2012. Effect of friction stir welding parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of 2219-t6 aluminum alloy joints. **International Journal of Material Forming**: 235–241.
- Humayan KabirRanaa, Mst. RashidaAkhtarb, Mohammad BoshirAhmed, PietroLiò, Julian M.W.Quinn, FazlulHuq, Mohammad AliMonie. 2019. Genetic effects of welding fumes on the progression of neurodegenerative diseases. **NeuroToxicology** Volume 71: Pages 93-101.
- Kazumi Fukuhara, Masayuki Inuzuka, Mitsuo Fujimoto, and Ryoji Ohashi. 2006. Welding tool for friction-stir welding weldingapparatus. **Patent No. US 2006/016974.0 A1 Pub. Date: Aug. 3 2006.**
- Kuntala Goutham Krishna, Aruri Devaraju, and Bollepelly Manichandra. 2017. Study on mechanical properties of friction stir welded dissimilar aa2024 and aa7075 aluminum alloy joints. **International Journal of Nanotechnology and Applications**. Volume 11, Number 3 285-291.
- R.S. Mishra and Z.Y. Ma, 2005. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering** 50: 1-78.



- Majid Elyasi, Hamed Aghajani Derazkola and Morteza Hosseinzadeh. 2016. Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of a441 aisi to aa1100 aluminium. **Journal Engineering Manufacture**.
- Mason, Jack Mansfield Thompson and. 2006. Friction stir welding machine and method. **Patent No. US 6,302,315 B1 Date of Patent: Oct. 16, 2001**
- Montgomery. 2009. Design and analysis of experiments. **John Wiley& Sons, New York**.
- Mouloud Aissani, Saliha Gachi, Fouad Boubenider and Younes Benkedda.2010. Design and optimization of friction stir welding tool. **Materials and Manufacturing Processes**. 25: 1199–1205, 2010 December 2010
- P. Shahi, M. Barmouz and Tarbiat Modares. 2014. Force and torque in friction stir welding. **Advances in Friction Stir Welding and Processing**
- State of global air.org. 2019. **Average annual population-weighted pm2.5. data online 17/2/2019**
- Vanama Santosh, V. Raghavendra Rao and C. H. Vasanth Kumar. 2017. Design and fabrication of friction stir welding end-effector for an abb irb1410 robot. **Indian Journal of Science and Technology**. Vol 10:
- W M Thomas, S W Kallee, D G Staines and P J Oakley. 2006. Friction stir welding – process variants and developments in the automotive industry. **In: Paper presented at 2006 SAE World Congress, 3-7 April 2006, Cobo Center, Detroit, Michigan, USA. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-process-variants-and-developments-in-the-automotive-industry-april-2006>**.
- Wikipedia.org. ALUMINIUM 2020 **<https://th.wikipedia.org/wiki> data online 27/7/2020**.
- Wikipedia.org. Ball Screw, 2021. **<https://www.pneumax.co.th/article-ballscrew> data online 4/8/2021**
- William R. Longhurst, Chase D. Cox, Brian T. Gibson, George E. Cook, Alvin M. Strauss, Isaac C. Wilbur and Brandon E. Osborne. 2016. Development of friction stir welding technologies for in-space manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 90: 81-91.

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## Mechanical properties of weld joint by friction stir welding on Aluminium Alloy 5083

Siriporn Khantongkum<sup>1</sup>[0000-0003-3379-776], Ukrit Thanasubtawee<sup>2</sup>, Winut Promdan<sup>3</sup>[0000-0002-6089-9316] and Somsak Siwadamrongpong<sup>3</sup>[0000-0001-7353-7325]

<sup>1</sup> Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, Chaiyaphum Rajabhat University 167 Muang Chaiyaphum, Thailand, 36000

<sup>2</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, 41/1 Paholayothin road, Mai Ngam, Muang Tak, Thailand, 63000

<sup>3</sup> School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Suranaree Sub-District, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000  
somsaksi@sut.ac.th

**Abstract.** The manufacturing industry, aluminium alloys were used in various applications such as the electric vehicle industry, marine industry and also aircraft industry. However, welding on some grades of aluminium alloys, for instance Al5083, might lead to problems at weldment such as crack, pin holes or incomplete weld joint. Friction stir welding was one of solid-state welding which might suit for such aluminium alloys. Therefore, this research was aimed to investigate mechanical properties of weldment on aluminium alloy 5083 welded by friction stir welding. Small friction stir welding machine was applied in this study. 2-factor of the welding parameters, rotation speed and welding speed, were studied. The rotation speed of three levels (1200, 1500, 1800 rpm), and two level of welding speed (30 and 60 mm/min) were employed. It was found that rotation speed of 1800 rpm and welding speed of 30 mm/min was found to yield good weldment and maximum tensile strength 224.41 MPa or 68.65% of based material.

**Keywords:** Friction stir welding, Stir tool, Al5083, Aluminium alloys

### 1 Introduction

In manufacturing processes, metal welding is the process of joining metal materials. The conventional welding techniques were fusion state welding which part of work pieces were melt together and additive metal might be added as additive to the welded zone. During melt state, the welded zone will be covered with gases to prevent oxidation of the metal and then the weld joint was cooled down and strengthened. There are many types of metal welding such as metal inert gas welding, resistance welding and laser welding. However, the fusion techniques usually used electrical energy as energy source and might release emissions to atmosphere. The air pollution generated from the industrial sector such as welding fumes and toxic gases was under consideration. In fumes from welding process, including of mixture of metal oxide, chemical complex of metal oxides, Silicate and fluoride. [1][2]. Recently, problems of pollution from

2

small particles less than 2.5 microns (PM2.5) accumulated in urban areas was rising. Thailand had an estimated 37,500 people who die prematurely as a result of this PM2.5 problems. [3]

The problem of welding metal and small dust particles PM2.5, therefore, non-polluting metal welding was invented. One of solid-state welding techniques, friction stir welding method (FSW), was firstly found to replace for some metal that hard-to-weld with fusion technique, especially for aluminium. The advantages included the micro-structure of fine grains and good weld metallurgical properties with low emission of greenhouse gases [4]. The current trend and situation of automotive industry to reduce product weight that might lead to low resource consumption (raw materials, fuel or electricity). There was forecasted that the future used material in automotive industry might change to use aluminium alloy in electric cars. [5] The research of Thomas WM, et al. [6] was indicated that the friction stir welding process could be applied in the automotive industry.

The friction stir process parameters were consisted of factors that affects welding performance such as geometry of stir tool, tool rotation speed and welding speed. These factors affected the mechanical properties of the weldment as reported by D. Trimble, et al., [7] A. Abdollahzadeh, et al., [8] Kuntala Goutham Krishna, et al. [9] The Al5083 was one grade of aluminium that known as hard-to-weld with fusion state technique. Therefore, the development of friction stir welding for such aluminium could create knowledge for further industrial applications. This research paper was aimed to investigate the effects of friction stir welding parameters on 5083 aluminium alloys.

## 2 Method and material

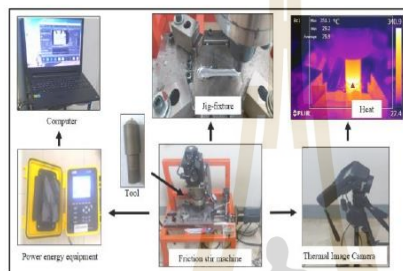
Aluminum alloy 5083 plate was prepared for friction stir welding, sized 100 X 50 mm with 4 mm thickness. The chemical composition of the Al5083 was indicated in Table 1. 2 plates were set up on the welding jig. The pin of stir tool was cylindrical shape with 3 mm in diameter and tool shoulder diameter was 15 mm as indicated in figure 1. The welding parameters were illustrated in Table 2. Full factorial design was employed to analyze the influence of 2 welding parameters, rotation speed and welding speed. Tool shape and tilt angle parameters was fix as displayed in Table 2. The welded work piece was cut in to specimen shape for tensile test following ASTM standard. The specimen preparation was done with CNC milling machine. figure 1 was showed the set-up of friction stir welding configuration on small friction stir welding machine. Thermal imaging cameras and electrical analysis device were also set-up for temperature and power using data along the welding. The stir pin was plugged into the plate at desired rotation speed until the tool shoulder was touched the plate as the electrical power was rapidly raised, as shown in figure 2. Then, the stir tool was dwelled for 5 minutes for rising of temperature and start to weld at specified welding speed

**Table 1** Chemical composition of Al5083 (%) by spectrometer

| Mg   | Mn   | Fe   | Si   | Cr   | Cu   | Ti   | Al   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 4.22 | 0.51 | 0.31 | 0.12 | 0.07 | 0.02 | 0.02 | Bal. |

**Table 2** Welding Parameters

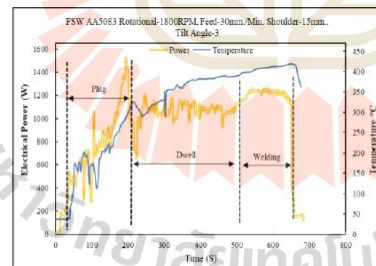
|                                   |               |            |           |
|-----------------------------------|---------------|------------|-----------|
| <b>Rotation speed</b>             | 1,200 rpm     | 1,500 rpm  | 1,800 rpm |
| <b>Welding speed</b>              | 30 mm./min    | 60 mm./min | -         |
| <b>Tool/Pin shoulder diameter</b> | 15 mm. / 3 mm |            |           |



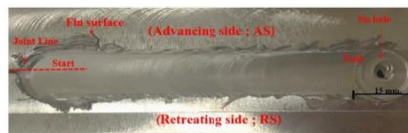
**Figure 1.** Set up of friction stir welding and measuring devices.

### 3 Result

From the welding samples, it was found that 2 plates were joint together along the weld line. The weldment width was wide as shoulder size, 15 mm, and some fin was found along the edge of weldment as displayed in figure 3. The similar results also reported by Surasit Rawangwong, et al.[10] that friction stir welding surface was glittering and circular mark of the flow of material on the weldment.



**Figure 2.** Pattern of electrical power and temperature during welding



**Figure 3.** Welded Surface of Specimen after Friction stir welding



4

From the tensile strength results, it was found that rotational speed of 1,800 rpm and welding speed of 30 mm/min was yielded the highest strength of 224.41 MPa or 68.65% of based material and illustrated in figure 4. Table 3 showed the analysis results of DOE on tensile strength of specimen. It was found that interaction between rotational speed and welding speed was the most important parameter to tensile strength. Main effects, rotational speed and welding speed, also significantly influence to the tensile strength with significant level of 0.05. It might be considered that higher rotational speed help in rising of temperature and lead to higher strength. However, the welding speed of 60 mm/min and rotational speed of 1800 rpm was yielded the lower of strength, it could be considered that the too high welding speed may make incomplete of material flow at the edge of stir zone that may lead to micro void, Huijie Liu, et al. [11]

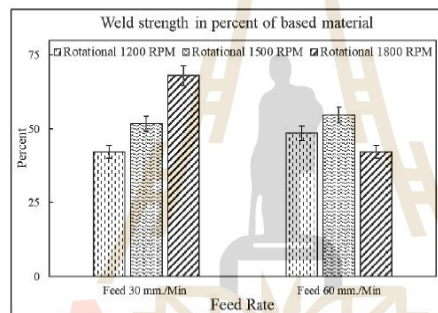


Figure 4 Tensile strength of specimen

Table 3 Analysis of design of experiment results on tensile strength

| Source                       | DF      | Adj SS  | Adj MS     | F-Value     | P-Value |
|------------------------------|---------|---------|------------|-------------|---------|
| Model                        | 5       | 10337.1 | 2067.42    | 25.57       | 0.001   |
| Linear                       | 3       | 3543.8  | 1181.27    | 14.61       | 0.004   |
| Rotational speed             | 2       | 2532.2  | 1266.09    | 15.66       | 0.004   |
| Feed rate                    | 1       | 1011.6  | 1011.64    | 12.51       | 0.012   |
| 2-Way Interactions           | 2       | 6793.7  | 3396.64    | 42.01       | 0.000   |
| Rotational speed * Feed rate | 2       | 6793.7  | 3396.64    | 42.01       | 0.000   |
| Error                        | 6       | 485.1   | 80.85      |             |         |
| Total                        | 11      | 10822.2 |            |             |         |
| Model Summary                | S       | R-sq    | R-sq (adj) | R-sq (pred) |         |
|                              | 8.99172 | 95.52%  | 91.78%     | 82.07%      |         |

#### 4 Conclusion

The weld joint of Al5083 was carried out by friction stir welding. All welding conditions were in good surface with fin along the edge of weldment. The welding parameters was found that interaction between rotational speed and welding speed was the most important parameter to tensile strength. Main effects, rotational speed and welding



speed, also significantly influence the tensile strength with significant level of 0.05. The highest tensile strength was found with rotational speed of 1,800 rpm and welding speed of 30 mm/min at 224.41 MPa or 68.65% of based material.

## 5 Suggestion

The influence of temperature and electrical power to tensile strength should be studied in further work.

## 6 Acknowledgement

The authors would like to thank you Suranaree University of Technology for research grant and support in equipment.

## References

- Humayan KabirRanaa, M.R., Mohammad BoshirAhmed, PietroLiò, Julian M.W.Quinn, FazlulHuq, Mohammad AliMonie, Genetic effects of welding fumes on the progression of neurodegenerative diseases. *NeuroToxicology*, 2019. Volume 71: p. Pages 93-101.
- Sansuksom, P., Risk assessment of worker exposure to metal fume produced in welding process. *Journal of Suvamabhumi Institute of Technology*, 2019.
- The annual State of Global Air.org ,“Average Annual Population-Weighted PM2.5” data online 30/6/2021
- Ma, R.S.M.a.Z.Y., *Friction stir welding and processing*. *Materials Science and Engineering* 2005, 50: p. 1-78.
- A.W. Orłowicz, M.M., M. Tupaj AndA. Trytek, “*Materials Used in the Automotive Industry*” *Archives of foundry engineering* ISSN (2299-2944), 2015. Volume 15
- Thomas WM, K.S., Staines DG and Oakley PJ., Friction stir welding – process variants and developments in the automotive industry. In: *SAE World Congress.*, 2006.
- D. Trimble, G.E.O.D., J. Monaghan, Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3. *Journal of Manufacturing Processes* 15 (2013) 495–500, 2015. 17: p. 141–150.
- A. Abdollahzadeh, A.S., J.M. Cabrera, A.P. Zhilyaev, H. Omidvar, *In-situ nanocomposite in friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy*. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2019. Volume 263: p. Pages 296-307.
- Kuntala Goutham Krishna, A. D., and Bollepelly Mamichandra. *Study on Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar AA2024 and AA7075 Aluminum Alloy Joints*. *International Journal of Nanotechnology and Applications*, Volume 11, (2017) p.285-291.
- S Rawangwong, W.B., Chatree Homkiew, and Watthanaphon Cheewawuttipong, *Effect of Parameter in Friction Stir Welding Dissimilar Joints of Aluminum Semi-Solid Metal Between SS304 and 7075*. *Naresuan University Engineering Journal*, 2015. p. pp. 21-30.
- Yu, H.L.H.Z.Q.P.L., Effect of friction stir welding parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints. *International Journal of Material Forming* · September 2011, 2012: p. 235–241.

## ประวัติผู้เขียน

ข้าพเจ้านายวินัย พรหมแดน เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม 2532 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนมัธยมพรสำราญ จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาเครื่องมือกลและซ่อมบำรุง ที่วิทยาลัยเทคนิคคูเมือง หลังจากสำเร็จการศึกษาได้ศึกษาต่อในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาเทคนิคการผลิต ในสถาบันเดิม และสำเร็จการศึกษาในปี 2553 จากนั้นได้เข้าทำงานที่บริษัทบางกอกแคนเมนูแฟคเจอร์ จำกัด ตำแหน่งพนักงานควบคุมเครื่องจักรเป็นเวลา 3 ปี หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา จบการศึกษาเมื่อปี 2559 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานเป็นผู้ช่วยวิจัยในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสิ่งทอและโพลีเมอร์ ในปี 2561 ได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโทได้รับหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี