

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA 7075-T651 โดยใช้อุปกรณ์  
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

**FRICION STIR WELDING OF AA7075-T651 ALUMINUM ALLOY USING  
DOUBLE-SIDED FRICTION STIR WELDING EQUIPMENT**

วรวงศ์ บุญช่วยแทน<sup>1</sup> จักรนรินทร์ ฉัตรทอง<sup>2</sup> วรธนพร ชีววุฒิมงคล<sup>3</sup> และ จตุพร ใจดำรง<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

<sup>1</sup>worapong.b@rmutsv.ac.th, <sup>2</sup>Jaknarin.c@rmutsv.ac.th, <sup>3</sup>watthanaphon.c@rmutsv.ac.th,

<sup>4</sup>jatuporn.j@rmutsv.ac.th

<sup>1,2,3</sup>นักวิจัย, หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลศรีวิชัย, 1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

Worapong Boonchouytan<sup>1</sup>, Jaknarin Chatthong<sup>2</sup>, Watthanaphon Cheewawuttipong<sup>3</sup>  
and Jatuporn Jaidumrong<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamankala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd. Boyang  
Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,

<sup>1</sup>worapong.b@rmutsv.ac.th, <sup>2</sup>romadorn.b@hotmail.com, <sup>3</sup>watthanaphon.c@rmutsv.ac.th,

<sup>4</sup>jatuporn.j@rmutsv.ac.th

<sup>1,2,3</sup>Researcher, Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering,

Rajamankala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd. Boyang  
Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ และเพื่อศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้อุปกรณ์ดังกล่าว โดยที่อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่มีส่วนประกอบหลัก จำนวน 5 ชิ้นส่วน ประกอบด้วย แกนเพลลาขับ ชุดเฟือง ห้องเครื่อง เพลลาหมุน และหัวกวน โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสม AA7075-T651 ที่มีขนาดความกว้าง × ความยาว × ความหนา คือ 50 × 300 × 6 มิลลิเมตร ภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 14 20 และ

40 มิลลิเมตรต่อหน้าที่ ผลการทดลองพบว่า รอยเชื่อมเมื่อเพิ่มระดับความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะเกิดช่องว่าง (Hole) ที่มีจำนวนกว้างมากขึ้นในด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนกับเนื้อวัสดุที่มีความร้อนสะสมไม่มากพอขณะเชื่อม สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa ค่าความแข็งสูงสุด 156.4 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนค่าความแข็งแรงดัด ที่บริเวณด้านหน้า (Face Bend) สูงสุด 40.26 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 14 มิลลิเมตรต่อนาที และด้านหลัง (Root Bend) สูงสุด 26.10 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 14 มิลลิเมตรต่อนาที

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, หัวกวนแบบคู่, อุปกรณ์

#### ABSTRACT

This research aimed to design and make double-sided friction stir welding equipment and to study friction stir welding using the double-sided friction stir welding equipment. The double-sided friction welding equipment consisted of 5 major parts, i.e. drive shaft, gear train, engine compartment, rotary shaft, and friction stir welding head. AA7075-T651 aluminum alloy was used with 50 x 300 x 6 mm (width x length x thickness) under 3 levels of stir rotation speed, i.e. 710, 1,000, and 1,400 rpm and 3 levels of welding speed, i.e. 14, 20, and 40 mm/min. The findings from the experiment showed that there were wider holes in welds at the retreating side due to the friction between the stir welding head and materials that did not absorb enough heat during the welding process. Friction stir welding at the rotation speed of 710 rpm and welding speed of 14 mm/min produced the highest tensile strength of 360.58 MPa. The highest hardness was produced at the rotation speed of 710 rpm and welding speed of 40 mm/min. The highest bending strength at the face bend, 40.26 N, was produced at rotation speed of 710 rpm and welding speed of 14 mm/min. The highest bending strength at the root bend, 26.10 N, was produced at the rotation speed of 710 rpm and welding speed of 14 mm/min.

**KEYWORDS:** Friction Stir Welding, Double-Sided, Equipment

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะ อุตสาหกรรมยานยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังที่จะสังเกตได้จากยานพาหนะ ส่วนใหญ่ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เนื่องจากข้อดีของอะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบา มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความเหนียวสูง ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อการแตกหัก เชื่อมได้ดี และบำรุงรักษาได้ง่าย ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [1] จึงทำให้อุตสาหกรรม ผลิตเครื่องบิน (Aircraft Industry) อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industry) อุตสาหกรรมผลิต เรือ (Boat Industry) และอุตสาหกรรมผลิตรถไฟฟ้า (Electric Train Industry) นำอะลูมิเนียมไป ผลิตเป็นชิ้นส่วน (Part) ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เพื่อนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ (Product) ที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งสามารถช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีการใช้พลังงานที่น้อยลง โดยอะลูมิเนียม เกรด 5xxx ซึ่งเป็น อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม เกรด 6xxx อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม-ซิลิกอน และเกรด 7xxx อะลูมิเนียมผสมสังกะสี โดยทั้งสามเกรดนี้มักจะได้รับ ความสนใจในการใช้งานวิศวกรรมอย่างมาก เพราะมีสมบัติทางกลที่ดี [2] อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้งานของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่ได้กล่าว มาข้างต้น ที่มีประสิทธิภาพจะเกี่ยวข้องกับกรรมวิธีต่อเนื่องอื่น ๆ โดยเฉพาะกรรมวิธีการขึ้นรูป (Materials Forming) เพื่อสร้างสรรค์เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งมีการเชื่อมต่อ (Joint) เข้ามาเกี่ยวข้อง อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีข้อดีและข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการเชื่อมในสภาวะหลอม ละลาย เช่น มีความร้อนที่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุ ทำให้ไม่เกิดรูพรุนหรือรอยแตกในแนว เชื่อม ไม่เกิดการบิดตัวของแนวเชื่อม รวมถึงการใช้อุปกรณ์ในการเชื่อมที่น้อยกว่า เป็นต้น ดังนั้น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงกลายเป็นกระบวนการที่เหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมวัสดุ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรง [3] แต่การเชื่อมเสียดทานแบบกวนทั่ว ๆ ไป มีการนำ ผลงานวิจัยมาเผยแพร่และมีการวิจัยกันอย่างกว้างขวาง สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วย หัวกวนแบบคูล์นั้นก็มีการวิจัยที่เคยดำเนินการมาก่อนหน้า อาทิเช่น การศึกษาเปรียบเทียบการ เชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างเครื่องมือเชื่อมแบบคูล์กับเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยวโดยใช้วิธีการ เชิงตัวเลข จะศึกษาการกระจายอุณหภูมิ ความเครียด การไหลของวัสดุ และความเร็วของวัสดุ ผลการทดลองพบว่า การเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อมทั้งสองวิธี มีความสัมพันธ์ที่ดี เครื่องมือเชื่อมแบบ คูล์สามารถสร้างอุณหภูมิที่สูงกว่าเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว การกระจายความเครียดมีความสมมาตร กันสำหรับเครื่องเชื่อมแบบคูล์ในทางตรงกันข้ามกับไม่มีความสมมาตรในเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว การหมุนเชื่อมซ้อนทับกันตำแหน่งเดิมของเครื่องมือเชื่อมแบบคูล์ทำให้มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องใน รอยเชื่อมน้อยลงเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว [4] การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเครื่องมือเชื่อมแบบคูล์ วัสดุ AA 7108 T79 สำหรับศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม เครื่องมือเชื่อมแบบคูล์ช่วย สร้างความร้อนเพื่อให้วัสดุมีการเสียรูปพลาสติกในพื้นที่รอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมปราศจาก

ข้อบกพร่อง นอกจากนี้เทคโนโลยีการกวนของเครื่องมือเชื่อมแบบคู่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยพบว่าเครื่องมือเชื่อมแบบคู่หัวพินหกเหลี่ยม มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 208 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1500 รอบต่อนาที (rpm) และความเร็วเดินเชื่อม 70 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) [5] การออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือเชื่อมแบบคู่เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือเชื่อมแบบคู่และเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เครื่องมือเชื่อมแบบคู่สามารถช่วยให้เกิดการสร้างความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกอย่างรุนแรงในบริเวณแนวเชื่อม การเชื่อมที่ปราศจากข้อบกพร่องนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วหมุนเชื่อมเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยของความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อมด้วย ค่าความแข็งที่สูงขึ้นนั้นสังเกตได้จากความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้น [6] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นจะพบว่า เครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยวสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีการหมุนวนของเนื้อโลหะที่ไม่ทั่วถึง หรือการหมุนวนของเนื้อโลหะไม่เข้ากันดี ดังนั้นจึงเสนอการเชื่อมเสียดทานแบบกวนชนิดหัวกวนแบบคู่ (Double Twin Shoulder) ในการที่จะกำจัดข้อด้อยเหล่านั้นและส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพพรอยเชื่อมที่ดีกว่า

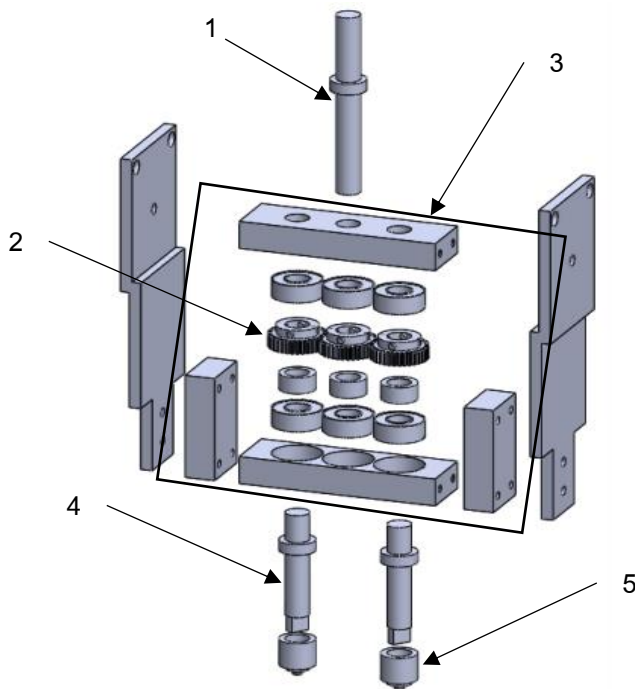
จากที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวกวนแบบคู่ (Double Twin Shoulder) โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อม คือ ปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม ปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติทางกล ประกอบด้วย ความแข็ง ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงดัด อีกทั้งนำผลการทดลองมาปรับปรุงเพื่อทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมทั้งในด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไปจะเป็นฐานข้อมูลในแก่ภาคอุตสาหกรรมได้นำไปปรับใช้ได้ต่อไป

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

### 2.1 การออกแบบของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

หลักการออกแบบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ แสดงดังรูปที่ 1 ได้ตั้งสมมุติฐานบนพื้นฐานของการใช้งานร่วมกับทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องกัดแนวตั้ง และกำหนดให้เพลลาหมุนของเครื่องกัดแนวตั้งเป็นเพลลาขับส่งกำลังไปยังส่วนอื่น ๆ และกลไกของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ กลไกการทำงานเริ่มต้นจากแกนเพลลาขับ (หมายเลข 1) จะถูกสวมเข้ากับหัวจับของเครื่องกัดแนวตั้ง (Collet Holder) จากนั้นก็จะส่งกำลังหมุนไปยังชุดเฟือง (หมายเลข 2) ซึ่งชุดเฟืองจะมี 3 ตัว แต่ละตัวจะเป็นเฟืองตรง โมดูล 1.5 มีจำนวนฟัน 35 ฟัน ซึ่งเฟืองตัวกลางจะทำหน้าที่หมุนส่งกำลังต่อไปยังเฟืองขับตัวข้างทั้งสองหมุนตามและหมุนไปพร้อม ๆ กัน โดยมีอัตราการส่งกำลังเท่ากับ 1:1 นั้น

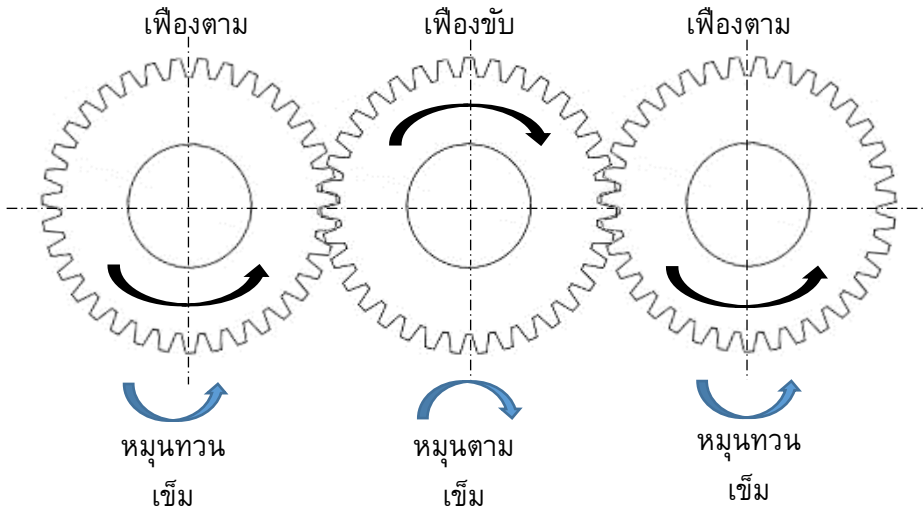
หมายความว่า ถ้ากำหนดให้เครื่องกัดแนวตั้งหมุนด้วยความเร็วรอบ 710 rpm ก็จะทำให้เฟืองตามหมุนด้วยความเร็วรอบ 710 rpm เช่นเดียวกัน ซึ่งชุดเฟืองจะบรรจุอยู่ในห้องเครื่อง (หมายเลข 3) ซึ่งภายในจะมีชุดลูกปืนทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อให้ชุดเฟืองหมุนได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ชุดเฟืองที่ทำหน้าที่หมุนตามทั้งสองตัวปลายอีกข้างจะต่อเข้ากับเพลลาหมุน (หมายเลข 4) สำหรับการรองรับการหมุนที่เชื่อมต่อกับเพลลาขับ และส่วนปลายของเพลลาหมุนจะประกอบเข้ากับหัวกวน (หมายเลข 5) ที่จะมีทั้งหัวพิน (Pin) และบ่ากวน (Shoulder) ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนได้ในยามที่ต้องการศึกษาหรือทดลองในรูปแบบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1 แบบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

## 2.2 กลไกการส่งกำลังของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

ระบบการส่งกำลังของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่มีต้นกำลังมาจากการหมุนของเพลลาหัวเครื่องกัดแนวตั้งแล้วส่งกำลังต่อมายังชุดเฟือง ซึ่งชุดเฟืองจะมีเฟืองที่ขบกันอยู่ 3 ตัว โดยตัวตรงกลางจะรับการส่งกำลังโดยตรงมาจากการหมุนของเพลลาหัวเครื่องกัดแนวตั้ง แล้วไปหมุนขับให้เฟืองที่อยู่ด้านข้างหมุนตามในทิศทางที่ต่างกัน โดยที่เฟืองที่อยู่ด้านขวาจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ส่วนเฟืองที่อยู่ด้านซ้ายจะหมุนตามเข็มนาฬิกา แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กลไกการส่งกำลังของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

### 2.3 หัวกวนของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

หัวกวนจะทำหน้าที่หมุนอยู่ในเนื้อของวัสดุและดำเนินการกวนเนื้อของวัสดุให้เคลื่อนที่มารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีส่วนประกอบทั้งหัวพิน (Pin) และบ่ากวน (Shoulder) โดยหัวพิน (Pin) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร (mm) และมีความยาว 5 mm และบ่ากวน (Shoulder) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หัวกวนของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

### 2.4 กระบวนการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

วัสดุทดลองอะลูมิเนียม AA7075-T651 ขนาดความกว้าง × ความยาว × ความหนา คือ 50 × 300 × 6 mm โดยมีส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก) แสดงดังตารางที่ 1

### ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก) ของวัสดุทดลอง

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	Tensile Strength (MPa)
AA7075-T651	0.4	0.5	1.5	0.3	2.50	5.50	0.2	0.23	Bal.	538.70

เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) ยี่ห้อ OBRAECI STROJE รุ่น FGV 32 สำหรับใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสองหัว และประกอบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ แสดงดังรูปที่ 4

ปัจจัยในการทดลอง 2 ปัจจัย ประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 710 1,000 และ 1,400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 14 20 และ 40 mm/min โดยเป็นการเชื่อมแบบต่อชนในท่าราบ



รูปที่ 4 การประกอบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

### 2.5 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ในทุก ๆ สภาวะการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ (ก) เปิดเครื่องกัดแนวตั้งให้หัวพินหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา (ข) จากนั้นหัวพินสอดลงไปใ้ในเนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวพินพุกสอดไปในระยะความลึกที่กำหนดเป็นระยะเวลา 30 วินาที (s) เนื่องจากระยะเวลาที่กำหนดนั้น ทำให้อะลูมิเนียมเกิดการหลอมละลายที่ดี



และสามารถไหลวนรอบ ๆ หัวพินได้สะดวกก่อนทำการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่กำหนด (ค) จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวหัวพิน และปากของเครื่องมือจะทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบ ๆ หัวพิน (ง) เดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนดในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุ (จ) ทำให้เกิดรอยต่อขึ้น (ฉ) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกหัวพินออกจากรอยเชื่อม ก่อนทำการยกหัวพินควรให้การเสียดทานที่เกิดจากหัวพินคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 30 s แสดงดังรูปที่ 5



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

## 2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค เมื่อเชื่อมชิ้นงานเสร็จแล้วดำเนินการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตาเบื้องต้นไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ของรอยเชื่อม จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทำการตัดชิ้นงานทดสอบตามแบบที่กำหนด จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปหล่อด้วยน้ำยา Epoxy Resin แล้วดำเนินการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 320 จนถึงเบอร์ 1500 ตามลำดับ เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนผิวหน้าของชิ้นทดสอบเรียบตามความต้องการแล้ว ก็ตามด้วยการขัดสักหลาดด้วยผงอะลูมินาขนาด 3, 0.5 และ 0.1 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ตามลำดับ



การทดสอบความแข็ง ชั้นทดสอบความแข็งจะเป็นชั้นทดสอบเดียวกันกับชั้นทดสอบที่ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค การทดสอบจะเป็นแบบวิกเกอร์กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1 mm แรงกดที่ใช้ 100 กรัมแรง (gf) เป็นเวลา 10 s

การทดสอบความแข็งแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุภายใต้การรับภาระหรือแรงแบบดึง ในขั้นตอนนี้ชั้นทดสอบที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะตัดตามขวางกับแนวเชื่อมเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงโดยขึ้นรูปชั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M นำชั้นทดสอบที่เตรียมโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1 mm/min

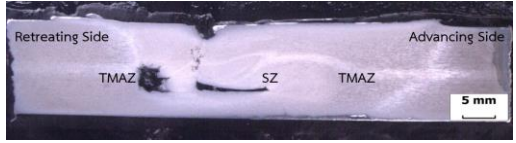

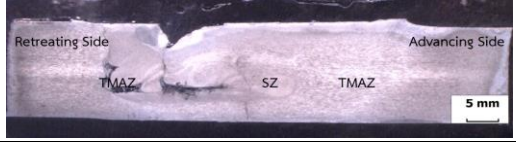




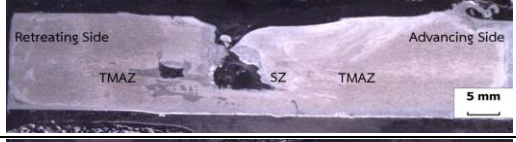
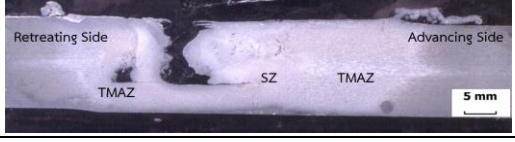
การทดสอบความแข็งแรงดัด เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการแปรรูปของวัสดุหลังจากทำการตัดโค้ง โดยพิจารณาดูว่าที่ผิวด้านนอกของชั้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการตัดโค้งเกิดรอยแตกขึ้นหรือไม่ หลังจากทำการตัดโค้งชั้นทดสอบด้วยวิธีมีความโค้งที่กำหนด จนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ การทดสอบบนรอยเชื่อมทั้งหมดโดยจุดสามจุดตามมาตรฐาน ASTM E8M นำชั้นทดสอบที่เตรียมโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมไปทดสอบการตัดโค้งที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดัด 1 mm/min

### 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าบริเวณรอยเชื่อมที่ถูกกวนมีขอบบพร่องเกิดขึ้นกับรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีไม่มากพอที่จะทำให้เนื้อโลหะเกิดการประสานกันระหว่างการเชื่อม เมื่อสังเกตก็จะพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะทำให้เกิดช่องว่าง (Hole) ในรอยเชื่อมกว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลมาจากการสะสมของความร้อนในแนวเชื่อมที่ไม่สามารถรักษาและสะสมความร้อนได้มากนักในขณะที่หัวกวนเร่งทำการหมุนเชื่อมอย่างต่อเนื่องจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ภาพรวมของโครงสร้างมหภาคได้นำเสนอพื้นที่ต่าง ๆ ของรอยเชื่อมที่มีบริเวณติดกันและต่อเนื่องกัน เช่น บริเวณรอยกวน (Stir Zone: SZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากทางกล (Thermo-Mechanical Affected Zone: TMAZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และเนื้อโลหะเดิม (Base Metal: BM) [7] และเป็นที่น่าสนใจในบริเวณรอยกวน พบว่ารอยเชื่อมที่เมื่อเพิ่มระดับความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะพบช่องว่าง (Hole) ที่มีจำนวนกว้างมากขึ้นในด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนกับเนื้อวัสดุที่มีความร้อนสะสมไม่มากพอขณะเชื่อม เมื่อเริ่มเดินแนวเชื่อมตามความเร็วเดินที่กำหนดทำให้เนื้อวัสดุยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก (Plastic

Deformation) ที่จะทำให้อันวัสดุไหลไปยังบริเวณต่าง ๆ ได้ตามความเร็วหมุนเชื่อมที่กำหนด [8]

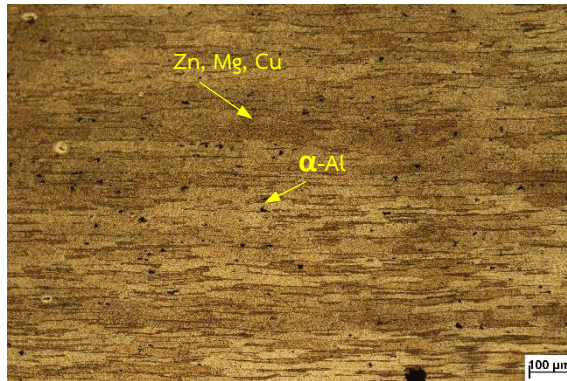
ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)	ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min)	ลักษณะโครงสร้างมหภาค
710	14	
	20	
	40	
1000	14	
	20	
	40	
1400	14	
	20	
	40	

รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

### 3.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

#### 3.2.1 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม










อะลูมิเนียมผสม AA7075-T651 แสดงดังรูปที่ 7 โครงสร้างของเกรนเฟส  $\alpha$ -Al (พื้นสีขาว) มีลักษณะเป็นแท่ง (Rod) ที่ยึดยาวต่อเนื่องกันมีโครงสร้างยูเทคติก Zn Mg และ Cu (ขอบสีดำ) จับกลุ่มรอบเฟส  $\alpha$ -Al



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมผสม AA 7075-T651

#### 3.2.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

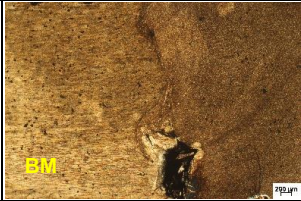
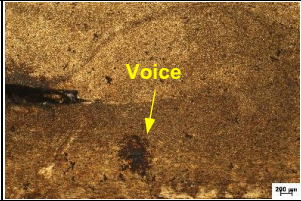
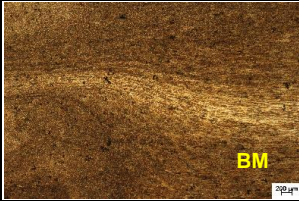




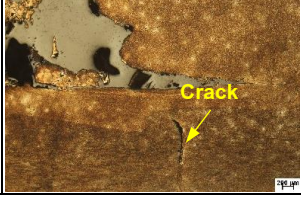

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่ต่างกัน ตามความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 1000 และ 1400 rpm แสดงดังรูปที่ 8-10 ตามลำดับ พบว่า บริเวณ SZ ของรอยเชื่อม เผยให้เห็นโครงสร้างเกรนที่ละเอียดและสมดุลกันเนื่องจากการตกผลึกใหม่แบบไดนามิกระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ส่วนเกรนในบริเวณ TMAZ Advancing Side (AS) และ TMAZ Retreating Side (RS) เผยให้เห็นถึงโครงสร้างที่บิดเบี้ยวอย่างมากของอะลูมิเนียมแมทริกซ์ที่มีการยึดตัวอย่างมากในเกรนอันเนื่องมาจากความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [9]

ความเร็ว เดินเชื่อม (mm/min)	TMAZ Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ Retreating Side (RS)
14			
20			
40			

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm


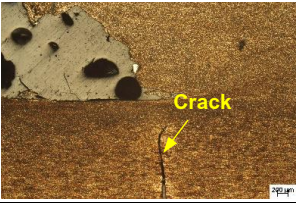


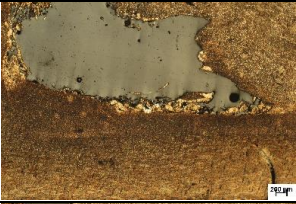



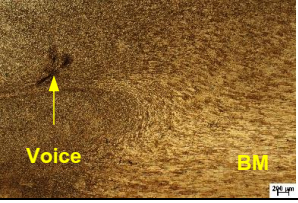
เมื่อลองวิเคราะห์ถึงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm พบว่าบริเวณ SZ เกรนมีความละเอียดและมีขนาดเล็กมากกว่าบริเวณ TMAZ แต่ยังคงปรากฏให้เห็นถึงรอยแตกร้าว (Crack) ขนาดเล็กในรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมจากการเสียดทานของเนื้อวัสดุกับเครื่องมือเชื่อมสะสมมากเกินไปจนเกิดความเครียดส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดรอยแตกร้าวดังกล่าว [10] นอกจากนี้บริเวณ TMAZ ทั้งด้าน AS และ RS ไม่พบรอยแตกร้าวแต่จะเห็นรูปร่างของเกรนที่บิดเบี้ยวไปเป็นอย่างมาก เกรนมีรูปร่างที่ยืดยาวออกเหมือนถูกดึงซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมที่ส่งผลโดยตรงต่อเนื้อวัสดุและโครงสร้างตามลำดับ



ความเร็ว เดินเชื่อม (mm/min)	TMAZ Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ Retreating Side (RS)
14			
20			
40			

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm

ข้อสังเกตจากโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในสภาวะที่เพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น (1000 – 1400 rpm) พบว่า เกรนบริเวณ SZ มีความละเอียดและเล็กกว่าความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำกว่า (710 rpm) อันเนื่องมาจากหัวพินซึ่งทำหน้าที่หมุนวนในรอยเชื่อมถูกแรงกดอัดที่สูงขึ้น ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณ SZ มีความร้อนสะสมที่มากขึ้นเกิดการตกผลึกแบบไดนามิก (Dynamic Recrystallization ; DRX) จนทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม เสียทานแบบกวนที่มีหัวพินเป็นสาเหตุนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงบริเวณ TMAZ ทั้งด้าน AS และ RS จะเห็นได้ว่ามีเกรนที่บิดเบี้ยวและยืดยาวออกมากขึ้นและเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมถึงขั้นสูงสุด (1400 rpm) สาเหตุเนื่องมาจากในกระบวนการเชื่อมเสียทานแบบกวน เครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับเนื้อวัสดุโดยตรงและเกิดการหมุนวนด้วยแรงเหวี่ยงจากความเร็วหมุนเชื่อมที่ได้รับส่งต่อกำลังมาจากเครื่องกัดแนวตั้ง เมื่อเครื่องมือเชื่อมได้รับแรงหมุนที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้เนื้อวัสดุที่อยู่ในสภาวะพลาสติกเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงหมุนจนทำให้มีโครงสร้างของเนื้อวัสดุที่มีทิศทางไปตามทิศทางเดียวกับการหมุนของเครื่องมือเชื่อมด้วย

ความเร็ว เดินเชื่อม (mm/min)	TMAZ Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ Retreating Side (RS)
14			
20			
40			

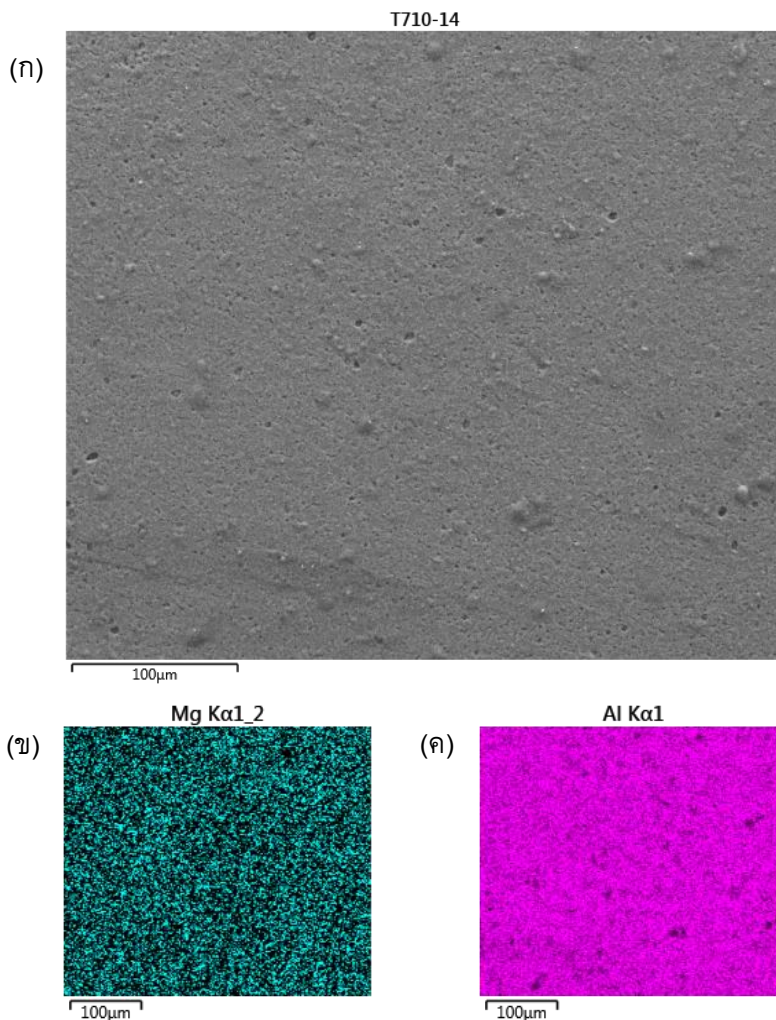
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm

จุดที่น่าสนใจของโครงสร้างจุลภาคก็อีกอย่าง พบว่า ความเชื่อมโยงของโครงสร้างมหภาคต่อเนื่องมายังโครงสร้างจุลภาคนั้นคือ ร่องรอยของสิ่งบกพร่องในแนวเชื่อมทั้งรูพรุน (Voice) หรือช่องว่าง (Holes) แต่สิ่งหนึ่งที่ไม่อาจมองเห็นได้ด้วยในระดับมหภาคคือ รอยแตกร้าจากความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำ (710 rpm) ไปถึงระบบที่สูง (1400 rpm) พบว่า มีรอยแตกร้าบริเวณ SZ ที่มีขนาดความยาวเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จุดสังเกตที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 20 mm/min เทียบกับ ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min เทียบกับ ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min จะเห็นว่าความยาวของรอยแตกร้าที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งย่อมส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงดึงที่จะกล่าวถึงต่อไป อย่างไรก็ตามการสังเกตดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการตกผลึกแบบไดนามิก (Dynamic Recrystallization; DRX) มีมากเกินไปจนทำให้เกิดการตกผลึกของเกรนที่สะสมในบริเวณ SZ และเนื้อวัสดุเกิดความเครียดมากเกินไปจนเกิดรอยแตกในที่สุด [11]

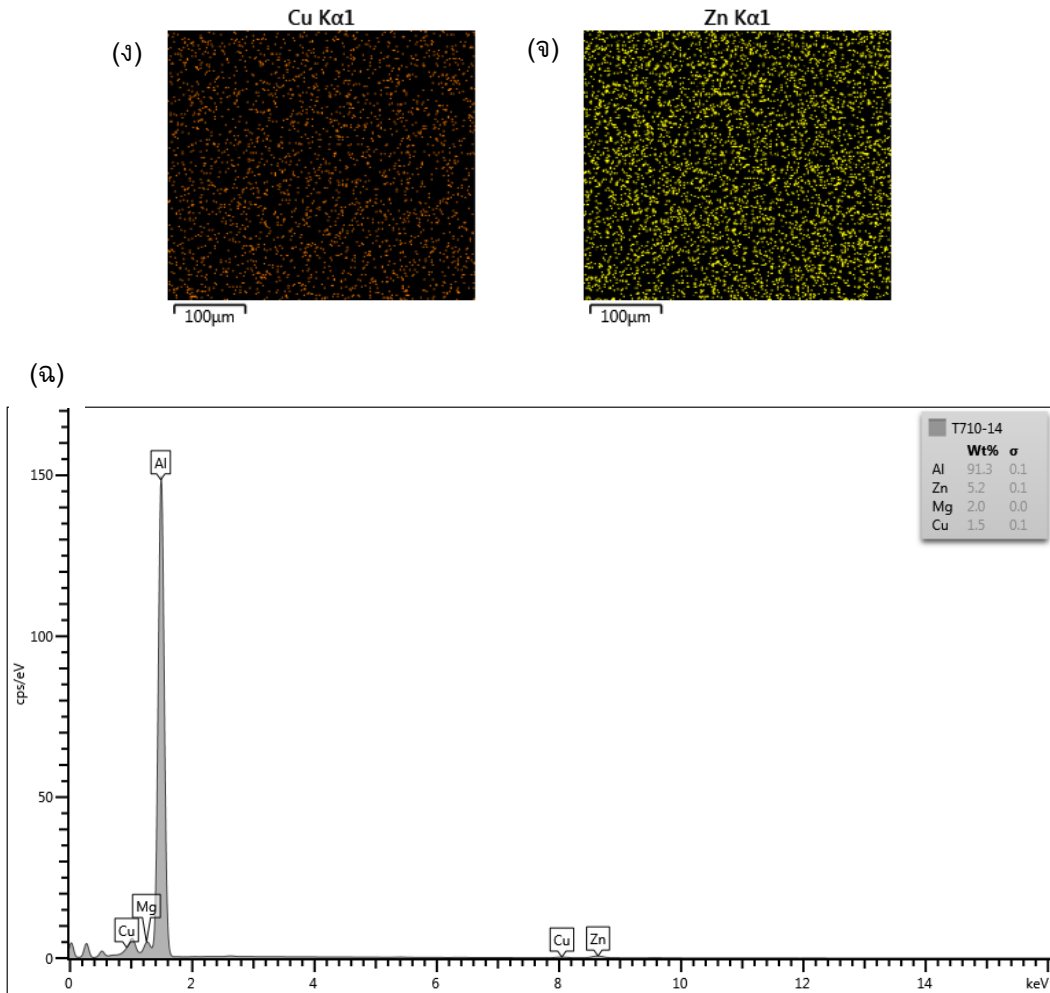
โครงสร้างทางจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min แสดงดังรูปที่ 11(ก) บริเวณแนวเชื่อม SZ เกิดการแตกหักของเฟส  $\alpha$  กระจัดกระจาย



ทั่วบริเวณที่ถูกกวน เกรนมีความละเอียดมากกว่าบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน TMAZ เนื่องมาจากบริเวณแนวเชื่อมจะถูกหมุนวนด้วยหัวพินโดยตรงจึงทำให้เกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่า นอกจากนี้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX) พบว่า การวิเคราะห์ห่อนุภาคในบริเวณนี้แสดงรูปที่ 11(ข-ค) แสดงให้เห็นว่ามี ส่วนประกอบของ Al เป็นเฟสหลักของรอยเชื่อม และมีเฟส สังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) และ ทองแดง (Cu) กระจุกกระจายอยู่ทั่วบริเวณรอยเชื่อมตามรูปร่างของรอยเชื่อม ส่วนรูปที่ 11(ง) แสดงการตรวจสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) พบว่ามีปริมาณธาตุ อะลูมิเนียม (Al) 91.3% ปริมาณธาตุ Zn 5.2% ปริมาณธาตุ Mg 2.0% และปริมาณธาตุ Cu 1.5% ตามลำดับ



รูปที่ 11 โครงสร้าง SEM และ EDX บริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ 11 โครงสร้าง SEM และ EDX บริเวณรอยเชื่อม (ต่อ)

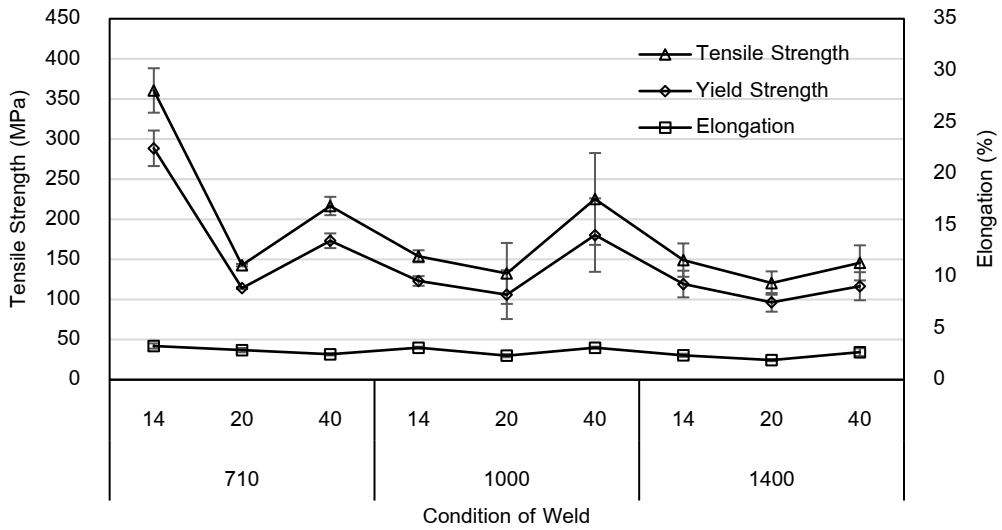
### 3.3 ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

ผลของค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบการทดลองพบว่า ที่สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 mm/min มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa ส่วนความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด คือ 120.51 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min ผลการทดลองสภาวะอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 2 เป็นสิ่งที่น่าสังเกตเมื่อพิจารณาผลของค่าความแข็งแรงดึงแล้วพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงค่อย ๆ ลดลง ซึ่งผลจากค่าความแข็งแรงดึงดังกล่าวมีอิทธิพลมาจากโครงสร้างทางจุลภาคที่เห็นได้ชัดว่าเกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น

ตารางที่ 2 ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
710	14	360.58	288.46	3.27
	20	142.78	114.22	2.87
	40	216.53	173.22	2.47
1000	14	153.86	123.09	3.10
	20	132.50	106.00	2.33
	40	225.33	180.26	3.10
1400	14	149.08	119.26	2.37
	20	120.51	96.41	1.90
	40	145.65	116.52	2.67
Base Metal	AA7075-T651	538.70	430.96	13.86

รูปที่ 12 แสดงกราฟค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนทุกสภาวะ จุดที่น่าสังเกต คือ สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 mm/min ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa ตรงปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยที่อยู่ต่ำที่สุดของการทดลองก็ว่าได้ กล่าวคือ เป็นปัจจัยที่ใช้ค่าความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำสุดของการทดลอง (710 rpm) และ ใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำสุดของการทดลอง (14 mm/min) แต่กลับได้ผลของค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากปัจจัยการเชื่อมที่สมดุลสามารถสร้างความร้อนที่เหมาะสมและมีปริมาณมากพอที่จะทำให้การเกิดการไหลของวัสดุอย่างเหมาะสม [12, 13] อีกครั้งการตกผลึกของเกรนอย่างพอดีซึ่งไม่เกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมจนเป็นเหตุให้มีค่าความแข็งแรงที่ดีได้ ขณะเดียวกันเมื่อลองพิจารณาไปถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด (Elongation) จะพบว่า มีค่าอัตราการยืดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ในทุก ๆ สภาวะการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเชื่อมที่มีข้อบกพร่องในรอยเชื่อมค่อนข้างมาก ประกอบกับปัจจัยการเชื่อมที่ยังไม่สมดุลเลยส่งผลทำให้ผลการทดสอบดังกล่าว

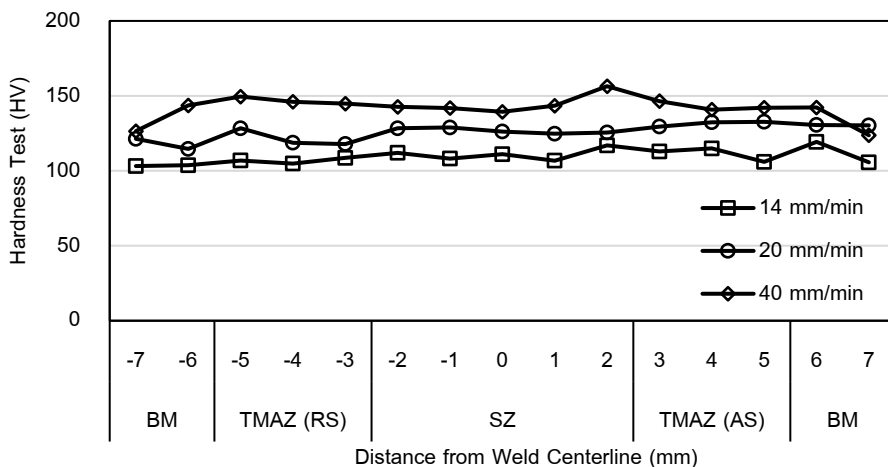


รูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนทุกสภาวะ

### 3.4 ความแข็งของรอยเชื่อม

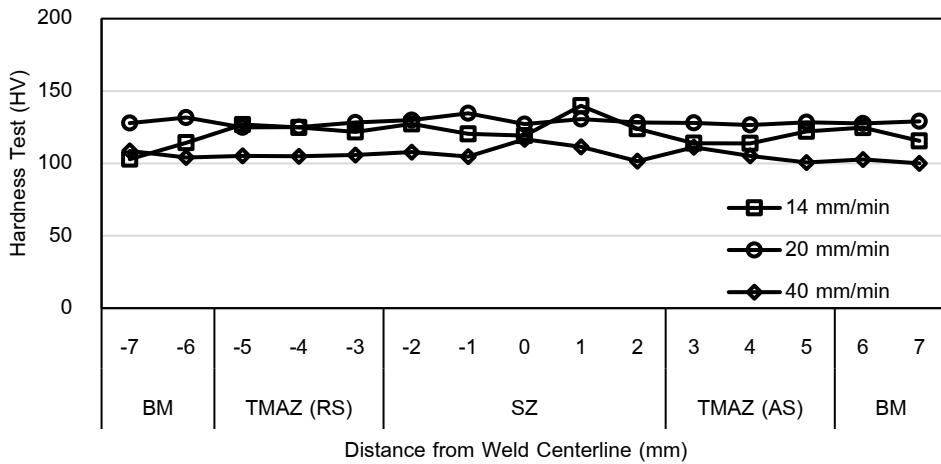
ผลของค่าความแข็งของรอยเชื่อมได้แสดงตามลำดับความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 rpm แสดงดังรูปที่ 13-15

1) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 20 และ 40 mm/min แสดงดังรูปที่ 13 พบว่า ความแข็งของชั้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min มีความแข็งประมาณ 156.4 HV ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min โดยมีความแข็งประมาณ 106.8 HV



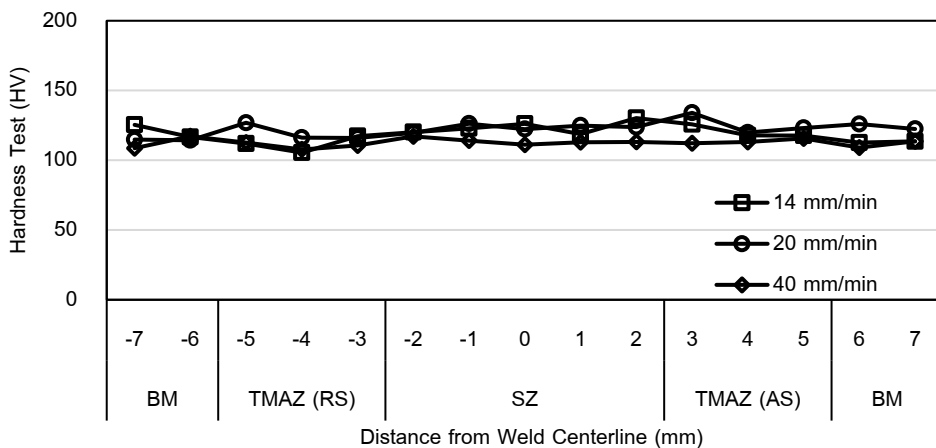
รูปที่ 13 กราฟความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm

2) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 20 และ 40 mm/min แสดงดังรูปที่ 14 พบว่า ความแข็งของชั้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min มีความแข็งประมาณ 138.9 HV ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min โดยมีความแข็งประมาณ 101.6 HV



รูปที่ 14 กราฟความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm

3) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 20 และ 40 mm/min แสดงดังรูปที่ 15 พบว่า ความแข็งของชั้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min มีความแข็งประมาณ 130.2 HV ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min โดยมีความแข็งประมาณ 111.1 HV



รูปที่ 15 กราฟความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm

รูปแบบการแสดงผลของความแข็งของรอยเชื่อมด้วยความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเชื่อมที่แตกต่างกัน เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความแข็งส่วนใหญ่เป็นค่าที่เกาะกลุ่มกันมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่านี้อโลหะเดิม สาเหตุเนื่องมาจากวัสดุในบริเวณ SZ ต้องผ่านการหมุนจนถึงสองครั้ง ทำให้ความเข้มข้นของการบ่อนความร้อนจะมากขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราการระบายความร้อนจึงมากกว่าวัสดุที่ใช้ผ่านขั้นตอนเดียว [6] ดังนั้นค่าความแข็งแรงสูงสุดของการทดลองในครั้งนี้เท่ากับ 156.4 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min และค่าความแข็งแรงต่ำสุดของการทดลองในครั้งนี้เท่ากับ 101.6 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min

### 3.5 ความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อม

ผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อม สำหรับที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 rpm แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อม

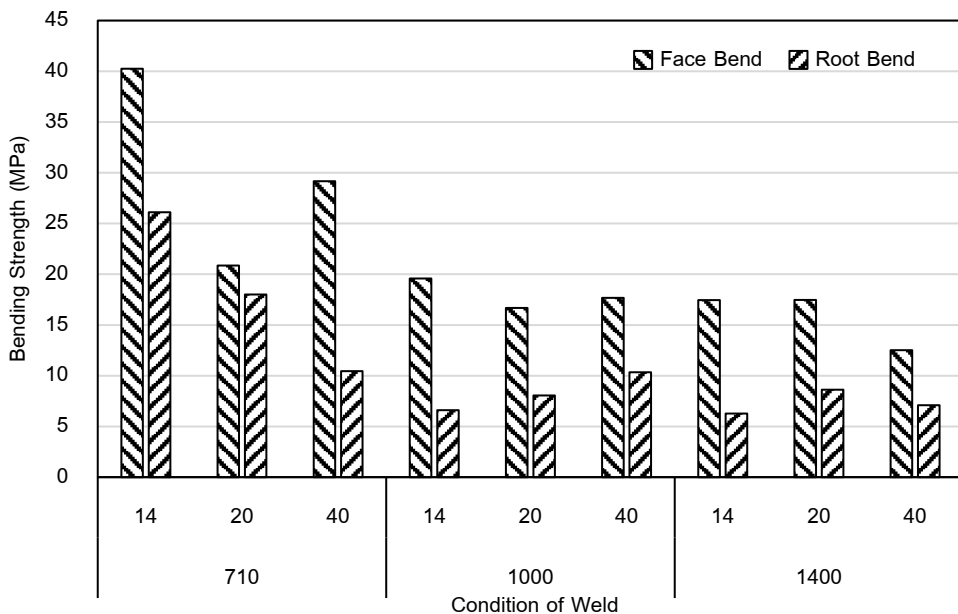
Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Bending Strength (MPa)	
		Face Bend	Root Bend
710	14	40.26	26.10
	20	20.86	18.00
	40	29.17	10.45
1000	14	19.58	6.60
	20	16.68	8.06
	40	17.68	10.34
1400	14	17.46	6.27
	20	17.47	8.62
	40	12.51	7.10

จากข้อมูลผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อมเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ในตารางที่ 3 สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 16 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อมการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA7075-T651 แบบหัวกวนคู่ พบว่า ค่าความแข็งแรงดัด (Bending Strength) ด้านหน้า (Face Bend) สูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม



14 mm/min เท่ากับ 40.26 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงดัดต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min ได้ค่าความแข็งแรงดัด เท่ากับ 12.51 MPa เมื่อพิจารณาถึงค่าความแข็งแรงดัด ด้านหลัง (Root Bend) สูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min เท่ากับ 26.10 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงดัดต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min ได้ค่าความแข็งแรงดัด เท่ากับ 6.27 MPa

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมผลการทดสอบความแข็งแรงดัดยิ่งลดลงทั้งด้านหน้า และด้านหลัง เนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกไม่สมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการเชื่อม เนื่องจากการสร้างความร้อนจากการเสียดทานไม่เหมาะสม [14] การแก้ปัญหาต้องเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมและลดความเร็วหมุนเชื่อม [15]



รูปที่ 16 ค่าความแข็งแรงดัดของของรอยเชื่อมเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

#### 4. สรุป

1) อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ มีส่วนประกอบหลัก 5 ชิ้นส่วน ประกอบด้วย แกนเพลลาขับ ชุดเฟือง ห้องเครื่อง เพลลาหมุน และหัวกวน โดยที่หัวกวนจะมีทั้งหัวพินและปากกวน

2) รอยเชื่อมเมื่อเพิ่มระดับความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะเกิดช่องว่าง ที่มีจำนวนกว้างมากขึ้นในด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนกับเนื้อวัสดุที่มีความร้อนสะสมไม่มากพอขณะเชื่อม

- 3) รอยแตกร้าวขนาดเล็กในรอยเชื่อม เกิดจากความร้อนที่สะสมมาจากการเสียดทานของเนื้อวัสดุกับเครื่องมือเชื่อมจนมากเกินไปเกิดความเครียดส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดรอยแตกร้าว
- 4) เกรนที่บิดเบี้ยวและยืดยาวในบริเวณ TMAZ ทั้งด้าน AS และ RS เกิดจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับเนื้อวัสดุโดยตรงและเกิดการหมุนวนด้วยแรงเหวี่ยง
- 5) สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 mm/min ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa
- 6) ค่าความแข็งแรงสูงสุดของการทดลองในครั้งนี้เท่ากับ 156.4 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min
- 7) ค่าความแข็งแรงดัด ด้านหน้าสูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min เท่ากับ 40.26 MPa และด้านหลังสูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min เท่ากับ 26.10 MPa

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรจัดงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2564 ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ การวิจัยและพัฒนานวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

### References

- [1] Wang GQ, Zhao YH, Tang YY. Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 2020;33(1):13-29.
- [2] Dimopoulos A, Vairis A, Vidakis N, Petousis M. On the friction stir welding of Al 7075 thin sheets. *Metals* 2021;11(1):57.
- [3] Sajadifar SV, Moeini G, Scharifi E, Lauhoff C, Bohm S, Niendorf T. On the effect of quenching on postweld heat treatment of friction-stir-welded aluminum 7075 alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2019;28(8):5255-65.
- [4] Rahul J, Kanchan K, Surjya KP, Shiv BS. Counter rotating twin-tool system in friction stir welding process: A simulation study. *Journal of Materials Processing Technology* 2018;255:121-8.
- [5] Maulikkumar BP, Komal GD. Studies the twin stir technology and welded parameters of friction stir welding on AA7108 T79. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology* 2021;13(6):592-8.

- [6] Kumari K, Pal SK, Singh SB. Friction stir welding by using counter-rotating twin tool. *Journal of Materials Processing Technology* 2015;215(1):132-41.
- [7] Song Y, Yang X, Cui L, Hou X, Shen Z, Xu Y. Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024-AA7075 aluminum alloy sheets. *Materials and Design* 2014;55:9-18.
- [8] Safarballi B, Shamanian M, Eslami A. Effect of post-weld heat treatment on joint properties of dissimilar friction stir welded 2024-T4 and 7075-T6 aluminum alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2018;28(7):1287-97.
- [9] Chen Y, Li H, Wang X, Ding H, Zhang F. A comparative investigation on conventional and stationary shoulder friction stir welding of Al-7075 butt-lap structure. *Metals* 2019;9(12):1264.
- [10] Ni Y, Fu L, Shen Z, Liu XC. Role of tool design on thermal cycling and mechanical properties of a highspeed micro friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 2019;48:145-53.
- [11] Zhang C, Huang G, Zhang D, Sun Z, Liu Q. Microstructure and mechanical properties in dissimilar friction stir welded AA2024/7075 joints at high heat input: effect of post-weld heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology* 2020;9(6):14771-82.
- [12] Padmanaban G, Balasubramanian V. Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy-An experimental approach. *Materials & Design* 2009;30(7):2647-56.
- [13] Sivaraj P, Kanagarajan D, Balasubramanian V. Effect of post weld heat treatment on tensile properties and microstructure characteristics of friction stir welded armour grade AA7075-T651 aluminium alloy. *Defence Technology* 2014;10(1):1-8.
- [14] Vetrivel SM, Giridharan K, Peter PD, Chakravarthi G, Stalin B, Alagar K, Manoj KP, Murugesan B. Microstructural and mechanical behaviors of friction stir welded dissimilar AA6082-AA7075 joints. *Advances in Materials Science and Engineering* 2021:4113895.
- [15] Pushpanath DP, Balamuruga KG, Mahadevan K. Investigation on the change effected by the tool type on the hardness of friction stir processed AA6063 aluminium alloy. *Journal of Applied Sciences* 2012;12(10):1067-70.

## ประวัติผู้เขียนบทความ



วรพงศ์ บุญช่วยแทน ปัจจุบันตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ E-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th



จักรนรินทร์ ฉัตรทอง ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม-การผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ E-mail: jaknarin.c@rmutsv.ac.th



วรรณพร ชีวติพงษ์ ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปริญญาเอก D.Eng. (Fiber Amenity Engineering) University of Fukui, Japan E-mail: watthanaphon.c@rmutsv.ac.th



จตุพร ใจดำรง ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม-การผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ E-mail: jatuporn.j@rmutsv.ac.th

## Article History:

Received: November 2, 2022

Revised: March 24, 2023

Accepted: April 1, 2023