

การศึกษาอิทธิพลรูปทรงตัวกวนในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน  
อลูมิเนียม 6063 ความหนาต่างกันรอยต่อชนแผ่นเทอร์เบลิ่งค์

**Effects of the Cylindrical Stirrer Types in the Friction Stir Welding of the Aluminum No. 6063  
Tailored Butt Blank Joint**

ชัญญุตรา มีมุข\* สุวัฒน์ ภูเกา และกิตติพงษ์ กิมะพงส์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก  
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 E-mail: chanandon@yahoo.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เสนอผลการศึกษาศึกษาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนแผ่นเทอร์เบลิ่งค์อลูมิเนียม 6063 ที่มีผลต่อสมบัติความแข็งแรงแนวเชื่อม ด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียววนซ้าย และทรงกระบอกเกลียววนขวา มีตัวแปรในการเชื่อมคือ ชนิดตัวกวน ความเร็วรอบของตัวกวน อัตราความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ผลการทดลองพบว่า การเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียววนซ้ายมีเศษ และครีบบับริเวณเริ่มกดตัวกวนเดินแนวเชื่อมเท่านั้น การเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียววนขวามีเศษครีบบับริเวณการเดินแนวเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นตาม เมื่ออัตราการเดินแนวเชื่อมสูงเกินไปค่าความแข็งแรงดึงลดลงในการทดลองมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 168 MPa. ที่การเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียววนขวา ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ค่าความแข็งแรงเมื่อเชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนซ้าย ความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานด้านที่หนา 3 มม. แต่ความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานด้านที่หนา 6 มม. ส่วนการเชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนขวาความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานทั้งสองด้าน โครงสร้างของแนวเชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนซ้ายและเกลียววนขวามีลักษณะของโครงสร้างที่กลมและเล็กละเอียดมากขึ้นส่งผลโดยตรงทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหลักที่มีเกรนขนาดใหญ่กว่า ทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลักเป็นสาเหตุทำให้เกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบบริเวณโลหะหลักด้านที่หนา 3 มม.

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เทลอร์เบลิ่งค์ รอยต่อชน

**Abstract**

This article presents the study result on of the effects of the clockwise and anticlockwise spiral cylindrical stirrers in the Friction Stir Welding (FSW) using the aluminum no. 6063 tailored blank butt joint in various

thicknesses. The welding variables were stirrer types, speed of the stirrers and welding speed. It was found that welding with anti-clockwise cylindrical spiral stirrer always formed burrs and residues along the weld bead. The higher the welding speed, the higher the tensile strength. However, lower tensile strength occurred when the welding speed was too high. The highest tensile strength obtained by the experiment was 168 MPa with welding by clockwise cylindrical spiral stirrer, at 300 rpm. and 100 mm./min (no period after rpm and mm). When welding with anti-clockwise cylindrical spiral stirrer, the strength of the weld bead zone appeared to be lowered than the strength of 3 mm. thickness, but higher than 6mm. thickness. On the contrary, when welding with the clockwise cylindrical spiral stirrer, the strength of weld bead zone appeared to be lowered than the strength of the both sides of the work piece. The nature of structure of the weld bead with clockwise and anti-clockwise cylindrical spiral stirrers became more round and delicate that directly resulted in increased joint strength in comparison to the main steel with larger grain. This caused the weld bead to have more strength than the main steel and it also caused the specimen to collapse at the main steel thickness of 3 mm.

**Keywords:** Friction Stir Welding, tailored blank, butt joints

## 1. บทนำ

ปัจจุบันงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้มีการแข่งขันของอุตสาหกรรม เป็นสาเหตุให้ต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมตลอดเวลา ทำให้มีการนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงไม่ต่างกันมาใช้ เช่น อลูมิเนียมชนิดต่างๆ มาใช้ทดแทนชิ้นส่วนบางอย่างที่ผลิตขึ้นจากเหล็กเพื่อเป็นการลดน้ำหนัก เช่น โครงสร้างและตัวถังรถยนต์ อุตสาหกรรมการต่อเรือ และอุตสาหกรรมการบินในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม มีความจำเป็นต้องใช้การเชื่อมต่อวัสดุชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ความหนาต่างกันหรือวัสดุชนิดเดียวกันมาเชื่อมประกอบกัน แต่ความแข็งแรงของวัสดุใกล้เคียงกับวัสดุเดิม (ธรรมบุญ อินทรพล, 2551) เรียกว่า (Tailored Blank) นำมาใช้ในอุตสาหกรรม ดังนั้นการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นอีก

ทางเลือกหนึ่งในการเชื่อมต่อวัสดุที่ยากต่อการเชื่อม ได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมต่อวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมอย่างเช่น อลูมิเนียม เหล็กและสแตนเลส การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นกระบวนการที่คิดค้นโดย TWI (The Welding Institute) ของสถาบันวิจัยเทคโนโลยีของอังกฤษในปี ค.ศ. 1991 เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) (Thomas et al., 1991; Thomas and Nicholas, 1997) ซึ่งมีความรวดเร็ว และแข็งแรง ในการเชื่อมต่อวัสดุที่มีความยากในการต่อเชื่อม ทำให้มีการใช้วิธีการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมรถยนต์, การต่อเรือและเครื่องบิน

อลูมิเนียม 6063 ซึ่งเป็นเกรดอุตสาหกรรมที่นิยมใช้กันทั่วไป เช่น งานกลึงชิ้นส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะหล่อรถยนต์ ส่วนประกอบในเครื่องจักร อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เครื่องประดับตกแต่ง งานปั๊ม

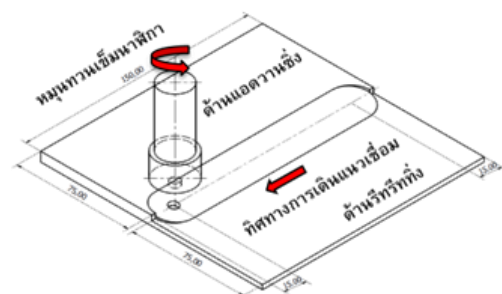
ขึ้นรูป งานแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม ได้มีการทดลองการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนรอยต่อของอลูมิเนียมผสม และรอยต่อของวัสดุต่างชนิด ได้อย่างมีประสิทธิภาพกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็งของการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลายกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งปัญหาที่มักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็งของการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลายจะหมดไป นอกจากนี้ผิวออกไซด์หนาที่เคลือบอยู่บนผิวของอลูมิเนียมจะถูกทำให้แตกออกด้วยการขัดหมุนของตัวกวนและกระจายไปทั่วทั้งแนวเชื่อม และลดปัญหาการเสื่อมสภาพของแนวเชื่อมลง (กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, 2551) และอิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม และรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมาก (ชงชัย เครือศรี และประกาศ เมืองจันทร์บุรี, 2551) ตัวกวนทรงเกลียววนซ้ายและวนขวาทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ไม่มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหล่ออลูมิเนียม (นราธิปแสงซ้ายและคณะ, 2551)

ผู้วิจัยจึงมีความต้องการที่ศึกษาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบบคัล อลูมิเนียม 6063 จากบทความข้างต้นด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย และทรงกระบอกเกลียวขวา โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษา ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมได้แก่ อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม 60 ถึง 125 มม./นาที ความเร็วรอบ 300 ถึง 500 rpm. มุมเอียงของ Tool (Pin) 2 องศา Mishra and Ma

ได้กล่าวไว้ว่า หากมีการเอียงตัวกวนเพิ่มมากขึ้นหรือรูปร่างของตัวกวนถูกออกแบบให้มีลักษณะที่คาดว่าทำให้เกิดการกวนที่รุนแรงขึ้นและจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นสามารถกำจัดออกได้ (Mishra and Ma, 2005) ซึ่งจากคำกล่าวนี้ผู้วิจัยจึงใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตัวกวนในการทดลองงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เฉพาะอิทธิพลของรูปทรงของตัวกวนเท่านั้น ส่วนอิทธิพลของปัจจัยอื่น ๆ ได้นำมาศึกษาวิเคราะห์และพัฒนาในโอกาสต่อไป

## 2. วิธีการทดลอง

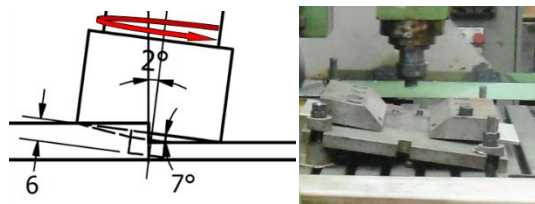
การทดลองนี้เป็นการศึกษาความสามารถเชิงกลคือ ความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมที่มีขนาดความหนาที่ต่างกันด้วยรอยต่อชน ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ารูปทรงของตัวกวนมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลอง โดยใช้ตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียววนซ้าย และทรงกระบอกเกลียววนขวา ในการเชื่อมกวดตัวกวนลงระหว่างกลางรอยต่อชนของอลูมิเนียม ที่ความลึกของตัวกวน 2.5 มม. ซึ่งบ่าของตัวกวนชิดขอบขวา และซ้ายเท่าๆกัน หมุนกวนในลักษณะทวนเข็มนาฬิกาเดินแนวเชื่อมยาวตลอดแนว แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 ความหนา 6.3 มม. และ 3 มม.

ในการหมุนของตัวกวน กำหนดให้หมุนทวนเข็มนาฬิกาเพื่อให้เนื้อของอลูมิเนียมที่มีความหนา 6.3

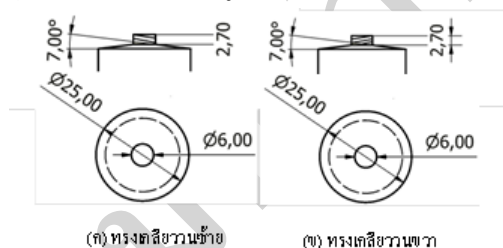
มม. เคลื่อนตัวมาเกาะติดบริเวณแนวเชื่อมฝั่งรีทริทที่ที่มีความหนา 3 มม. โดยเอียงมุมของอุปกรณ์ยึด 7 องศาแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 มิติของตัวกวนขณะเชื่อม (หน่วย: มม.)

### 3. วัสดุเครื่องมือและอุปกรณ์

ในการทดลองใช้อลูมิเนียมเกรด 6063 โดยในการเตรียมชิ้นงานทดลองใช้ชิ้นงานขนาดความกว้าง 75 มม. ยาว 150 มม. หนา 6.3 และ 3 มม. ตัวกวนทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ผ่านการชุบแข็ง โดยมีความแข็งประมาณ 58 – 60 HRC โดยรูปทรงของตัวกวนมีลักษณะเป็นเกลียวซ้ายและเกลียวขวา โดยมีขนาดของตัวกวน 6 มม. ลึก 2.7 มม. ป่าตัวกวนทำมุม 7 องศา แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 มิติของตัวกวนเครื่องมือเชื่อม (หน่วย: mm)

ในการเชื่อมประยุกต์ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติยี่ห้อ AVIASOP Made in Poland รุ่น SAX50469 ประกอบติดตั้งตัวกวนตามตัวแปรที่กำหนด ก่อนการเชื่อมทำการจับยึดชิ้นงาน (Jig) ประกอบเข้ากับอุปกรณ์จับยึด ติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานของเครื่องกัด ก่อนทำการ

ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตามตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

### 4. วิธีการทดลอง

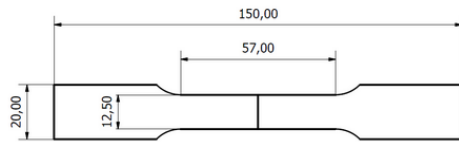
ในการทดลองนี้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยได้กำหนดตัวแปรในการทดลองไว้ 3 ตัวแปร คือ ตัวกวน อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อมและความเร็วรอบของตัวกวน โดยค่าตัวแปรในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรการทดลอง

รายการ	ค่าตัวแปร
ตัวกวน	เกลียววนซ้าย, เกลียววนขวา
อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม	60, 80, 100 และ 125 มม./นาที
ความเร็วรอบของตัวกวน	300, 400, และ 500 rpm.

เมื่อทำการเซ็ทเครื่องและจับยึดชิ้นงานเรียบร้อย ทำการเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนด โดยเมื่อเชื่อมเสร็จแต่ละครั้งปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศก่อนนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึด แล้วนำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมไปเตรียม สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อม

การตรวจสอบความสมบูรณ์แนวเชื่อมก่อนการเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล โดยสังเกตตรวจสอบผิวหน้าของรอยแนวเชื่อม เศษครีบทที่เกิดขึ้นจากการเชื่อม เมื่อตรวจสอบลักษณะของการเชื่อมแล้วนำชิ้นงานเตรียมทดสอบสมบัติทางกล คือค่าความแข็งแรงดึง การเตรียมใช้เครื่องจักรกลช่วยในการกัดตัดแบ่ง และทำขึ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM E8M-04 โดยขนาด และลักษณะของชิ้นทดสอบสมบัติทางกลแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM E8M-04

เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบตามขนาดและจำนวนที่ต้องการนำชิ้นงานที่ได้เข้าเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ใช้ความเร็วในการดึง 2 มม./นาที จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผล

การทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมใช้มาตรฐาน ASTM E92 โดยใช้เครื่องทดสอบไมโครวิกเกอร์ ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MMT-X7-LCD กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของบริเวณเนื้อแนวเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระเปาะร้อนระยะห่างของรอยกดแต่ละรอย 1 มม. โดยใช้แรงกด 50 kgf. และใช้เวลาในการกด 10 วินาที

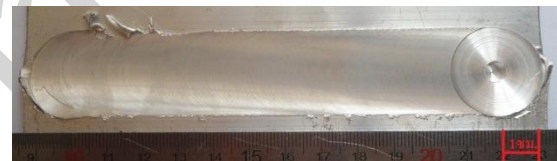
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมตัดชิ้นงานทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับเนื้อแนวเชื่อม จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาขัดกระดาษทราย และทำการกัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก กับน้ำกลั่น ตามมาตรฐาน ASTM E407 แล้วส่องด้วยกล้อง Optical micro scope ยี่ห้อ LEICA รุ่น SDM2500M ที่กำลังขยาย 200 เท่า

## 5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

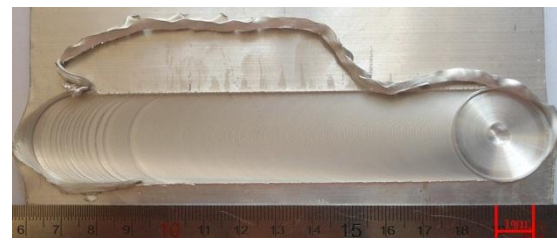
ผลการทดลองการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบบลงคือลูมิเนียม 6063 เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้ายและทรงกระบอกเกลียวขวา ที่มีผลต่อความสมบูรณ์ต่อชิ้นงานและความแข็งแรงของวัสดุ

การตรวจสอบด้วยตาเปล่าผิวหน้ารอยเชื่อมพบว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงเกลียวซ้ายมีเศษ

และครีบทึบบริเวณเริ่มกดตัวกวนเดินแนวเชื่อมเท่านั้น เพราะการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของตัวกวนที่มีลักษณะเป็นเกลียววนซ้ายสลับเกลียวทำหน้าที่ยกน้ำพาอลูมิเนียมขึ้นมาที่ปากของตัวกวนเนื้อชิ้นทดสอบจากด้านแอดวานซ์ไปด้านรีทริทึง ที่ความเร็วรอบและอัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ เช่น 300 rpm. 60 มม./นาที ทำให้เกิดลักษณะผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีรอยไม่สม่ำเสมอ เป็นคลื่นตลอดแนวเชื่อมหากใช้อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อมที่สูงขึ้น เช่น 80, 100 และ 125 มม./นาที ทำให้เกิดลักษณะผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีรอยสม่ำเสมอ เนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมยังน้อยทำให้เนื้อโลหะบางส่วนอยู่ในสภาวะพลาสติก แสดงดังรูปที่ 5 (ก)



(ก) เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนซ้ายความเร็วรอบ 300 rpm. อัตราการป้อน 100 มม./นาที

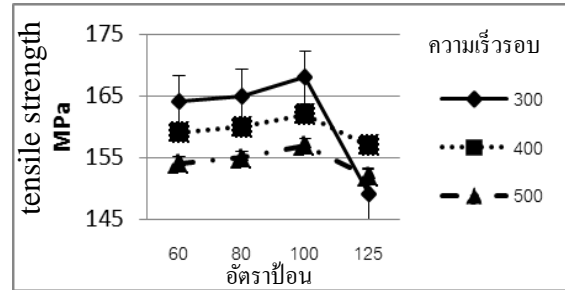


(ข) เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนขวาความเร็วรอบ 300 rpm. อัตราการป้อน 100 มม./นาที

รูปที่ 5 เปรียบเทียบผิวหน้าลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชงชัย เครือฝื่อ และคณะ (ชงชัย เครือฝื่อ และประกาศ เมือง จันทบุรี, 2551) รอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงเกลียวขวาพบว่ามีเศษ และครีบทึบบริเวณเริ่มกดตัวกวนเดินแนวเชื่อมตลอดแนวเชื่อมด้านรีทริทึง ทุกความเร็วรอบและอัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม เพราะการ

หมุนทวนเข็มนาฬิกาของตัวกวนที่มีลักษณะเป็นเกลียววนขวา สันเกลียว ทำหน้าที่หมุนนำพอลูมิเนียมลงมาที่ปลายของตัวกวน และนำพาเนื้อของชั้นทดสอบออกด้านข้าง ตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ปาดด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม กัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 5 (ข)



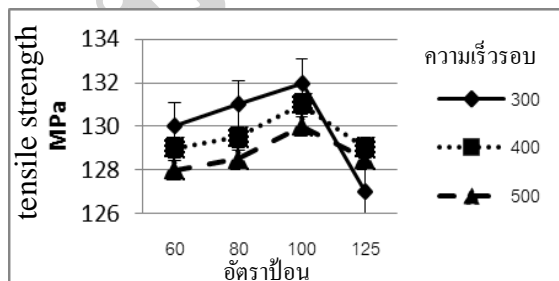
(ข) เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนขวา

รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง

## 6. ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึง

จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยเกลียววนซ้ายที่อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ความเร็วรอบของตัวกวน 300 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดที่ 132 MPa. และที่อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม 80 มม./นาที ความเร็วรอบของตัวกวน 300 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่ 127MPa. แสดงดังรูปที่ 6 (ก)

ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยเกลียววนขวาที่อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ความเร็วรอบของตัวกวน 300 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดที่ 168MPa. และที่อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ความเร็วรอบของตัวกวน 300 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุดที่ 149MPa แสดงดังรูปที่ 6 (ข)

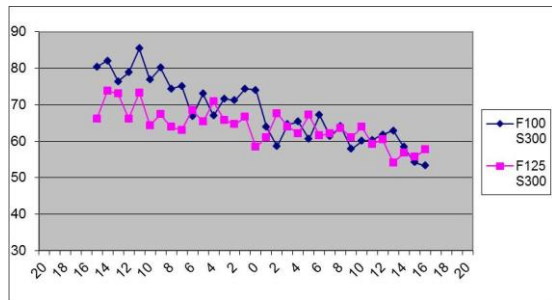


(ก) เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนซ้าย

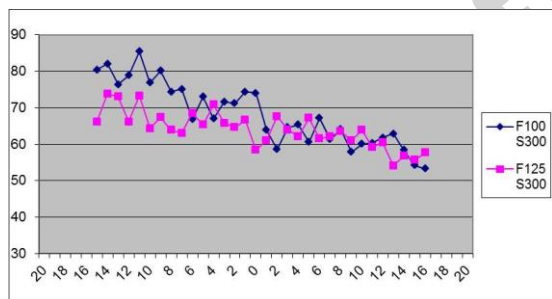
ซึ่งจากค่าความแข็งแรงดึงที่ได้พบว่าความเร็วรอบของตัวกวนและอัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อมที่ต่างกันส่งผลต่อความแข็งแรงดึง ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อมสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงดึงลดลงเมื่ออัตราการป้อนสูงเกินไป ทั้งตัวกวนเกลียววนซ้ายและตัวกวนเกลียววนขวา โดยพบว่าที่อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อมที่ 60 – 100 มม./นาที ความแข็งแรงดึงสูงขึ้นตามลำดับ แต่ลดลงเมื่ออัตราการป้อนที่ระดับ 125 มม./นาที แต่ค่าความแข็งแรงดึงของอัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อมสวนทางกับค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วของตัวกวน เพราะจากรูปที่ 6 ทั้ง (ก) ตัวกวนเกลียววนซ้าย และ (ข) ตัวกวนเกลียววนขวา เห็นว่าความเร็วรอบของตัวกวนยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเท่าใด ค่าความแข็งแรงดึงก็ยิ่งลดลง เพราะจากการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วรอบของตัวกวนที่ 300 rpm ที่มีความเร็วในการทดสอบต่ำสุด ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ที่อัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม 60 – 100 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงลดลงตามลำดับ โดยความเร็วรอบที่ 500 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด แต่เมื่อพิจารณาที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 125 มม./นาที พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของตัวกวนที่ความเร็ว 300 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด ซึ่งทำให้เห็นได้ว่า ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าความเร็วของตัวกวน

**7. ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรง**

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงถึงสูงสุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ความเร็วรอบตัวแกน 300 rpm. และต่ำสุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ความเร็วรอบตัวแกน 300 rpm. พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงถึงสูงสุด แข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงถึงต่ำสุด เมื่อพิจารณาตัวแกนเกลียววนซ้าย แสดงดังรูปที่ 7 (ก)



(ก) เชื่อมด้วยตัวแกนเกลียววนซ้าย



(ข) เชื่อมด้วยตัวแกนเกลียววนขวา

รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรง

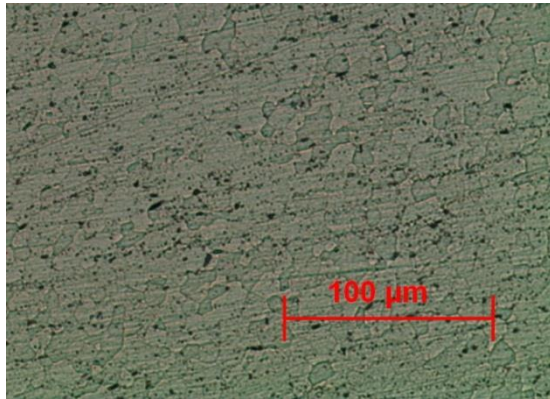
พบว่า ความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานด้านที่หนา 3 มม. แต่แข็งแรงมากกว่าชิ้นงานด้านที่หนา 6.3 มม. และเมื่อพิจารณาแนวกราฟพบว่าแนวโน้มความแข็งแรงของชิ้นงานด้านความหนา 3 มม. ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการกดห่างจากแนวเชื่อมออกไป และแนวโน้มค่าความแข็งแรงของชิ้นงานด้านความหนา 6.3 มม. ลดลงตามระยะการกดที่ห่างจากแนวเชื่อมออกไปอย่างชัดเจน

พิจารณาตัวแกนเกลียววนขวา แสดงดังรูปที่ 7 (ข) พบว่า ความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานทั้งสองด้าน เมื่อพิจารณาแนวกราฟพบว่า แนวโน้มความแข็งแรงของชิ้นงานทั้งด้านความหนา 3 มม. และ 6.3 มม. พบว่า ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการกดห่างจากแนวเชื่อมออกไป ซึ่งจากแนวโน้มความแข็งแรงที่ได้เห็นได้ว่า ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นมาจากอิทธิพลของความร้อน ที่เกิดจากการเชื่อมส่งผลต่อโครงสร้างของเนื้อโลหะงานเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มของความแข็งแรงที่ต่างกันในแต่ละจุดที่ทำการทดสอบ

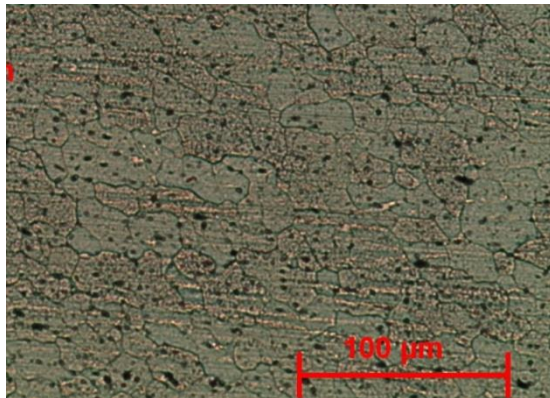
**8. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค**

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงถึงสูงสุดพบว่าตัวแกนเกลียววนซ้ายมีลักษณะของขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 16.85 ไมโครเมตรแสดงดังรูปที่ 8 (ก) ตัวแกนเกลียววนขวามีลักษณะของขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 26.5 ไมโครเมตรแสดงดังรูปที่ 8 (ข) ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) ตามมาตรฐาน ASTM โครงสร้างทั้งแบบเกลียววนซ้ายและเกลียววนขวา ไม่ได้แตกต่างกันมากนักซึ่งลักษณะของเม็ดเกรนที่มีความละเอียดและรูปร่างที่กลมมนขึ้นนี้เกิดจากกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้ก่อให้เกิดผลึกเกรนใหม่ (Dynamic Re-crystallization) ของอลูมิเนียมขึ้น (พันธุพงษ์คงพันธุ์ และคณะ, 2551) ส่งผลโดยตรงทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหลักที่มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 167.17 ไมโครเมตร ในโลหะเชื่อมมีความกลมมนและเล็กละเอียดกว่าแสดงดังรูปที่ 8 ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลัก





(ก) เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนซ้ายความเร็วรอบ 300 rpm. อัตราการป้อน 100 มม./นาที



(ข) เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนขวาความเร็วรอบ 300 rpm. อัตราการป้อน 100 มม./นาที

รูปที่ 8 โครงสร้างแนวเชื่อมบริเวณพื้นที่การกวน

## 9. บทสรุป

จากการศึกษาอิทธิพลรูปทรงของเกลียววนซ้ายและเกลียววนขวาด้วยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวด ได้ข้อมูลและผลการทดลองซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

1. การเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงเกลียววนซ้ายมีเศษและครีบที่บริเวณเริ่มกวดตัวกวนแนวเชื่อมเท่านั้น ตัวกวนเกลียววนขวามีเศษ และครีบที่บริเวณเริ่มกวดตัวกวนเดินแนวเชื่อมตลอดแนวเชื่อม ทุกความเร็วรอบและอัตราการป้อนของการเดินแนวเชื่อม

2. ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นตาม แต่ค่าความแข็งแรงดึงลดลง

เมื่ออัตราการเดินแนวเชื่อมสูงเกินไป เมื่อความเร็วรอบตัวกวนยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเท่าใด ค่าความแข็งแรงดึงลดลงความแข็งแรงดึงสูงสุดในการทดลองมีค่าเท่ากับ 168 MPa. ที่ตัวกวนทรงเกลียววนขวา ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนว 100 มม./นาที

3. ค่าความแข็งแรงเมื่อเชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนซ้าย ความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานด้านที่หนา 3 มม. แต่แข็งแรงมากกว่าชิ้นงานด้านที่หนา 6.3 มม. ส่วนการเชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนขวาความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานทั้งสองด้าน

4. โครงสร้างของแนวเชื่อมด้วยตัวกวนเกลียววนซ้ายและเกลียววนขวา มีลักษณะของโครงสร้างที่มีลักษณะของเม็ดเกรนที่มีความละเอียดและรูปร่างที่กลมมนขึ้นนี้ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลักเป็นสาเหตุทำให้เกิดการพังทลายบริเวณโลหะหลักด้านที่หนา 3 มม.

## 10. เอกสารอ้างอิง

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์. (2551). การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวด: การแก้ปัญหาการต่อวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมหลอมละลาย. การประชุมข่างานวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2551. ประเทศไทย, 20-22 ตุลาคม 2551: 712-716.

ธงชัย เครือฝื่อ และประภาศ เมืองจันทร์บุรี. (2551).

อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวด. การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3 ภาควิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ร่วมกับสถาบัน



- เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (ISIT) และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ณ โรงแรมเซนจูรี่ พาร์ค ระหว่างวันที่ 26-27 ตุลาคม 2552
- ธรรมบุญ อินทรพล.(2551).อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์ต่อสมบัติทางกลของรอยต่อชนแผ่นเทอเลอร์แบดิ่งเหล็กเคลือบสั๊กกะสี เกรด SGACD.การประชุมข่ายงานวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี: 579-583.
- นราธิป แสงชัย,สงกรานต์ บางศรีณย์ทิพย์ และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2551).อิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความต้านแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม AA6063-T1. การประชุมข่ายงานวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี2551. ประเทศไทย, 20-22 ตุลาคม2551: 718-723.
- พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์, บุญส่ง จงกลนี้ และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2551). อิทธิพลความเร็วเดินแนวของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 . การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6.สงขลา ประเทศไทย,8-9 พฤษภาคม 2551: 561-566.
- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. (2005). Friction Stir Welding and Processing. *Mat Sci. and Eng. R.50*: 1-78 Industries. *Materials and Design*. 18: 269-273
- Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P. and C.J. Dawes. (1991). Friction Stir Welding. G.B. Patent Application.No.9125978.8.
- Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. (1997). "Friction Stir Welding for the Transportation Industries". *Materials and Design*. 18: 269-273.