



การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนและความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430

Relative Study of Friction Stir Welding Parameter and Shear Strength of Lap Joint between AA6063 Aluminum Alloy and AISI430 Ferritic Stainless Steel

ศักดิ์ชัย จันทศรี<sup>1</sup>, สมควร แวดี<sup>1</sup>, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์<sup>1</sup>

Sakchai Chantasri<sup>1</sup>, Somkuan Vaodee<sup>1</sup>, Kittipong Kimapong<sup>1</sup>

**บทคัดย่อ**

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด AISI430 ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกย ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมและทำให้เกิดแนวเชื่อมมีความแข็งแรงเฉือนเท่ากับ 11,870 นิวตัน คือความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของตัวกวน 3.1 มิลลิเมตร และความเอียงของตัวกวน 2 องศา การลดความเร็วรอบ การเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อม และการเพิ่มความเอียงของเครื่องมือเชื่อมสามารถเพิ่มความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยให้สูงขึ้นและแสดงตำแหน่งการพังทลายที่แตกต่างกันในชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อแสดงชั้นการรวมตัวและอัดตัวของโลหะทั้งสองซึ่งเกิดจากการกวนที่รุนแรงของเครื่องมือเชื่อม

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานกวน ความแข็งแรงเฉือน รอยต่อเกย อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม

**Abstract**

This article aims to study an effect of friction stir welding parameter on shear strength of lap joint between AA6063 aluminum alloy and AISI430 ferritic stainless steel. The experimental results show that the variation of the welding parameters affected to vary the shear strength of the lap joint. The optimized welding parameter that produced the shear strength of 11,870 N in this experiment was the rotating speed of 250 rpm, the welding speed of 50 mm/min, the pin depth of 3.1 mm and the tool tilt angle of 2 degrees. The decreasing of the rotating speed, the increase of the welding speed and the increase of the tool tilt angle could produce high shear strength of the lap joint and showed the different fracture location in the test specimens. Interface structure of the lap joint indicated the combination and the compaction of the metals caused by the severe stirring of the welding tool.

**Keywords:** Friction stir welding, Shear strength, Lap joint, Aluminum, Stainless steel

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani



## บทนำ

รอยต่อเกาะระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กมีการใช้งานเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ เนื่องจากการทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น และสามารถนำข้อดีของโลหะแต่ละชนิดมาใช้งานได้กว้างขวางขึ้น นอกจากนี้รอยต่อเกาะสามารถทำให้น้ำหนักโครงสร้างของรถยนต์ลดลง และทำให้การใช้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (Dinda, Basiruddin, Roy, & Srirangam, 2016) อย่างไรก็ตามการเชื่อมโลหะทั้งสองเข้าด้วยกันนั้นยากลำบาก เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติทางกล ทางเคมี และทางกายภาพ ก่อให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ ในรอยต่อ เช่น ความเค้นตกค้าง หรือการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่แข็งแรงในโลหะเชื่อม เป็นต้น จุดบกพร่องเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการลดความแข็งแรงเนื่องของรอยต่อเกาะ (Zheng, Feng, Shen, Huang, & Zhao, 2016)

การเชื่อมเสียดทานกวนเป็นวิธีการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่มีการพัฒนาเพื่อเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่นอะลูมิเนียมผสม ซึ่งพบว่ามีประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า เช่นการเชื่อมรอยต่อเกาะระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 80% ของอะลูมิเนียมผสมและแสดงการเพิ่มความแข็งแรงเมื่อปริมาณสารประกอบกึ่งโลหะลดลง (Kimapong & Watanabe, 2005) หรือรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม 6061 และเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (Zheng, Feng, Shen, Huang, & Zhao, 2016) หรือรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม AA5052 และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง HSLA (Ramachandran, Murugan, & Shashi Kumar, 2015) หรือรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้า St37 (Pourali, Abdollah-zadeh, Saeid, & Kargar, 2017) เป็นต้น ค่าความแข็งแรงของรอยต่อเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นเกิดได้เมื่อความหนาของชั้นสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound: IMC) มีค่าลดลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดความเร็วรอบการหมุนตัวกวนและการเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อมให้มีค่าสูงขึ้น ผลการดำเนินการดังกล่าวทำให้ค่าความร้อนที่ใส่แกวรอยต่อ (Heat input) ลดลง (Tanaka, Morishige, & Hirata, 2009)

จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าพิจารณารอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI430 ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติทางกล กายภาพ และเคมีแตกต่างกัน มีการใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตในปริมาณที่คาดว่าอาจเพิ่มขึ้นในอนาคต หากมีการศึกษาวิธีการเตรียมและวิธีการเชื่อมรอยต่อเกาะระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

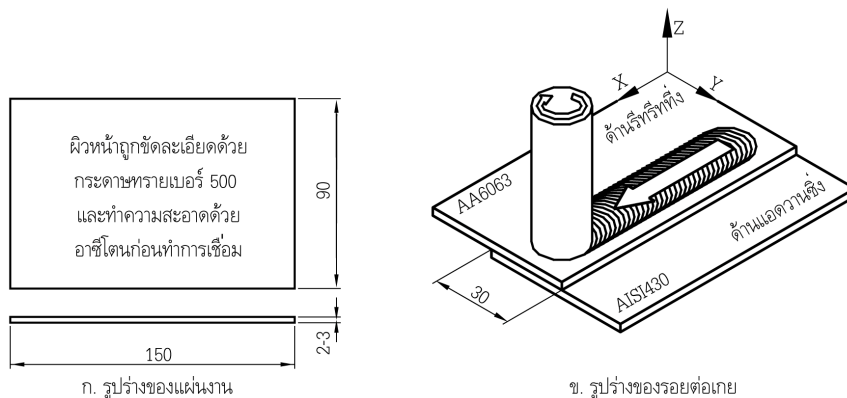
## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนรอยต่อเกาะระหว่างอะลูมิเนียมผสมแผ่นรีด เกรด AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ริติกแผ่นรีดเกรด AISI430 ที่มีต่อความแข็งแรงเหนือนและตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกาะ

## วิธีการทดลอง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุในการทดลอง (%น้ำหนัก)

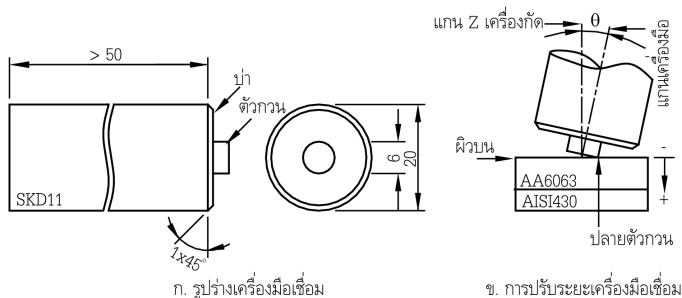
วัสดุทดลอง	Al	Fe	C	Si	S	Cu	Cr	Mg	Mn	P	V	Mo
AA6063	สมดุล	0.06	0.00	0.16	0.02	0.02	0.01	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
AISI430	0.00	สมดุล	0.12	0.50	0.02	0.00	16.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
SKD11	0.00	สมดุล	1.50	0.40	0.03	0.00	12.00	0.00	0.60	0.03	0.35	1.00



ภาพที่ 1 รูปร่างและขนาดของรอยต่อเกย (หน่วย: มิลลิเมตร)

วัสดุในการทดลอง คือ แผ่นรีดอะลูมิเนียมผสม เกรด AA6063 หนา 3.0 มิลลิเมตร และแผ่นรีดเหล็กกล้าไร้สนิม เฟอร์ริติก เกรด AISI430 หนา 2.0 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีของโลหะทั้งสองแสดงไว้ในตารางที่ 1 แผ่นโลหะทั้งสองถูกตัดด้วยเครื่องตัดแผ่นโลหะด้วยการเฉือนแบบแห้งให้ได้ขนาดความกว้าง 90.0 มิลลิเมตร ยาว 150.0 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1 ก. กำหนดให้ทิศทางการรีดขนานกับแนวความยาวของแผ่นชิ้นงาน ครีบกึ่งที่เกิดจากการตัดและผิวหน้าของแผ่นโลหะถูกขัดละเอียดด้วยกระดาษทราย (Emery paper) แบบแห้งจนได้ความละเอียดเบอร์ 500 (Grit number 500) และทำความสะอาดพื้นผิวให้สะอาดด้วยอะซิโตนทุกครั้งก่อนนำแผ่นชิ้นงานไปทำการเชื่อม การประกอบชิ้นงานเป็นรอยต่อเกย แผ่นโลหะทั้งสองถูกประกอบและยึดแน่นในอุปกรณ์การจับยึดที่ถูกยึดแน่นบนเครื่องกัดอัตโนมัติ ในการทดลองกำหนดให้แผ่นอะลูมิเนียมวางต่อเกยบนแผ่นเหล็กกล้าที่ระยะ 30.0 มิลลิเมตร แผ่นอะลูมิเนียมถูกวางไว้ที่ด้านรีที่ทิ้ง (Retreating side) หรือด้านที่ทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม (Welding tool) ส่วนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม ขณะที่แผ่นเหล็กถูกวางไว้ที่ด้านแอดวานซ์ (Advancing side) หรือด้านที่ทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม (Welding tool) มีทิศทางเดียวกับทิศทางการเดินแนวเชื่อมดังภาพที่ 1 ข.

เครื่องมือเชื่อมมีรูปร่างทรงกระบอกดังภาพที่ 2 ก. ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ คือ บ่าเครื่องมือเชื่อม (Tool shoulder) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20.0 มิลลิเมตร และตัวกวน (Stirrer) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.0 มิลลิเมตร และมีความยาววัดจากบ่าเครื่องมือถึงปลายตัวกวน 3.0 มิลลิเมตร เครื่องมือเชื่อมนี้ต้องมีความยาวมากกว่า 50.0 มิลลิเมตรเพื่อความมั่นคงในการจับยึดกับเครื่องกัดอัตโนมัติ โลหะที่ใช้ในการทำเครื่องมือเชื่อม คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold work tool steel) เกรด JIS-SKD11 หลังจากขึ้นรูปด้วยวิธีการกลึงให้ได้รูปร่างดังภาพที่ 2 ก. แล้ว เครื่องมือถูกนำไปทำการชุบแข็ง เพื่อให้ได้ความแข็งที่ต้องการ

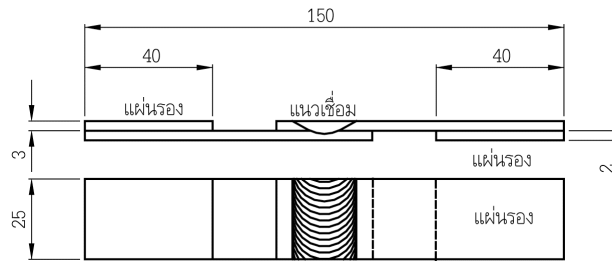


ภาพที่ 2 เครื่องมือเชื่อม (หน่วย: มิลลิเมตร)

เมื่อทำการประกอบรอยต่อเข้าที่แทนเครื่องกัดและติดตั้งเครื่องมือเชื่อมเข้ากับเครื่องกัดเรียบร้อยแล้ว ก่อนการเชื่อมได้มีการปรับระยะจุดเริ่มต้นความลึกของการเชื่อมโดยระยะความลึก 0.0 มิลลิเมตร คือระยะที่ปลายของตัวกวนแตะผิวด้านบนของรอยต่อเกยดังภาพที่ 2 ข. ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนที่มีการศึกษาในการทดลองนี้ประกอบด้วยความเร็ว 125-750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-175 มิลลิเมตรต่อนาที และความเอียงของตัวกวน 1-5 องศา (ความเอียงของตัวกวนคือมุมระหว่างแกนของเครื่องมือเชื่อมและแกน Z ของเครื่องกัด ดังภาพที่ 2 ข.)

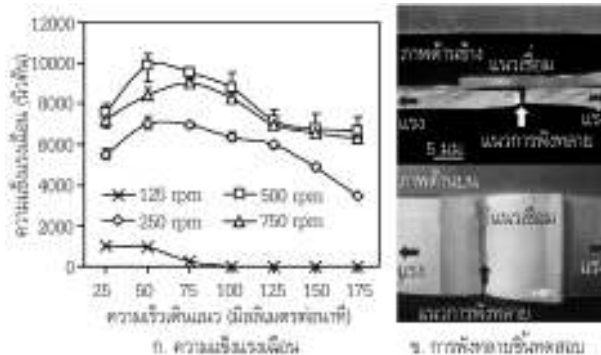
นำรอยต่อเกยที่ผ่านการเชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมที่กำหนดมาตรวจสอบสมบัติต่างๆ ประกอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงเหนือน และการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา การทดสอบความแข็งแรงเหนือน ทำโดยตัดรอยต่อเกยให้มีขนาดดังภาพที่ 3 ด้วยใบตัดขัดสี (Abrasive cutting wheel) ที่มีการหล่อเย็นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะวิทยาของชิ้นงาน ส่วนการทดสอบความแข็งแรงดึงเพื่อป้องกันและรักษาให้พื้นที่การเชื่อมที่พื้นผิวสัมผัส (Interface) ให้ขนานกับแนวแรง นำแผ่นรองจับที่มีความหนาเท่ากับแผ่นอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าใส่เข้าไปที่ตำแหน่งการจับชิ้นงานดังภาพที่ 3 การทดสอบกำหนดให้มีอัตราการเกิดความเครียด (Strain rate) เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที รอยต่อที่ถูกตัดออก

การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาแบ่งออกเป็น การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค ชิ้นทดสอบถูกตัดขวางตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม หรือระยะเท่ากับ 75.0 มิลลิเมตรจากด้านปลายของรอยต่อ ชิ้นที่ได้จากการตัดถูกนำไปทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-1500 ขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร และกัดผิวหน้า ด้วยสารละลายที่กำหนดด้านอะลูมิเนียมเท่านั้น โครงสร้างที่ได้ถูกนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light optical microscope: LOM) ต่อไป



ภาพที่ 3 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงเหนือน (หน่วย: มิลลิเมตร)

### ผลการทดลองและการวิจารณ์

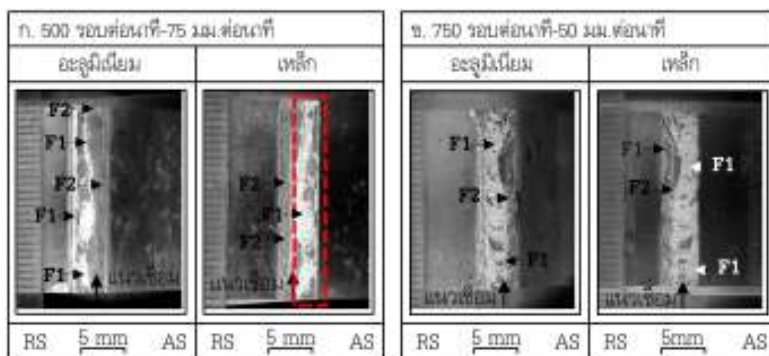


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ความเร็วเดินเชื่อม และความแข็งแรงเหนือน



ภาพที่ 4 ก. แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยอะลูมิเนียมและเหล็กที่ความเร็วรอบของตัวกวน 250-750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-175 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของตัวกวน 3.1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าระยะความลึกที่ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงที่สุดในการเชื่อมเสียดทานกวนรอยต่อเกยอะลูมิเนียม A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 (Kimapong & Watanabe, 2005) และความเอียงของตัวกวน 2 องศา พบว่าที่ความเร็วรอบต่ำ 125 รอบต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-75 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อมีค่าต่ำกว่า 900 นิวตัน และเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที รอยต่อเกยมีความแข็งแรงต่ำ แผ่นอะลูมิเนียมหลุดออกจากเหล็กกล้าในขั้นตอนการถอดรอยต่อเกยออกจากอุปกรณ์จับยึดหลังจากเชื่อม และหลุดออกจากกันในช่วงขั้นตอนการตัดเพื่อเตรียมขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึง ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าความเร็วรอบต่ำ 125 รอบต่อนาทีไม่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานกวนรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 การพังทลายลักษณะนี้คาดว่ามีส่วนมาจากที่ความเร็วรอบต่ำและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าสูงทำให้เกิดความร้อนเสียดทานที่เป็นตัวแปรสำคัญทำให้โลหะเกิดการอ่อนตัว ไหลตัว ทำให้การอัตรวมเข้าด้วยกันของโลหะทั้งสองบริเวณรอยเชื่อมมีคาลดลง และไม่ก่อให้เกิดการรวมตัวของอะลูมิเนียมและเหล็ก

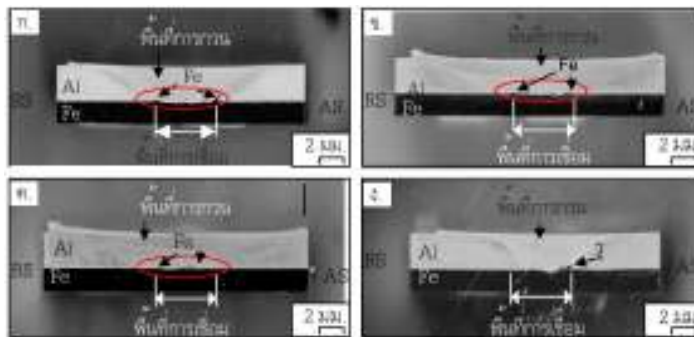
เมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องมือเชื่อมเท่ากับ 250 รอบต่อนาที ความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยมีค่าเพิ่มขึ้นสามารถนำรอยต่อเกยที่ได้จากการเชื่อมนำมาทำการเตรียมเป็นชิ้นทดสอบแรงเฉือนได้ ความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มจาก 25 เป็น 50 มิลลิเมตรต่อนาที และแสดงความแข็งแรงเฉือนสูงที่สุดดังภาพที่ 4 ก. โดยขึ้นทดสอบความแข็งแรงเฉือนนั้นเกิดการพังทลายที่ส่วนของอะลูมิเนียมแต่ไม่เกิดการพังทลายที่บริเวณแนวเชื่อมดังภาพที่ 4 ข. หลังจากนั้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยมีค่าที่ลดลง การลดลงของความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยเมื่อค่าความเร็วเพิ่มขึ้นนี้เกิดจากความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ทำให้เวลาและความร้อนในบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นไม่เพียงพอต่อการประสานอะลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก ดังผลการทดลองการเชื่อมเสียดทานกวนรอยต่อชนและรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กที่แสดงค่าความร้อนและเวลาไม่เพียงพอ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อมสูงเกินไปจะทำให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นทดสอบ และทำให้ความแข็งแรงเฉือนลดต่ำลง (Tanaka, Morishige, & Hirata, 2009)



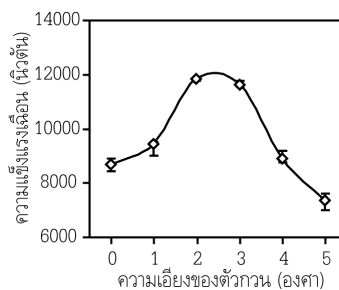
ภาพที่ 5 พื้นผิวของการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงเฉือน

ที่ความเร็วรอบสูงกว่า คือ 500 และ 750 รอบต่อนาที พบว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยมีค่าที่ต่ำลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การพังทลายเกิดตามแนวขนานรอยเชื่อมดังภาพที่ 5 ก. และ ข. (การตรวจสอบที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมแตกต่างกันเนื่องจากต้องการแบ่งแยกการพังทลายที่มีความแตกต่าง) เมื่อพิจารณาพื้นที่เกิดการเชื่อมติดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กของรอยพับทลาย พบพื้นที่ที่แตกต่าง 2 พื้นที่ คือ พื้นที่การเชื่อมยึดมากกว่าสี่ขาที่ขั้วบนแผ่นอะลูมิเนียมและเหล็ก (แสดงด้วยอักษร F1) และพื้นที่การเชื่อมยึดน้อยกว่า แสดงลักษณะคล้ายครึ่งวงกลมต่อเนื่องตลอดแนวการพังทลาย

(แสดงด้วยอักษร F2) ผิวการพังทลายของหินทดสอบที่แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนสูงกว่า คือ ชั้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาทีนั้น ด้านอะลูมิเนียมและเหล็กพบพื้นขาวที่ที่เกิดการฉีกขาดของอะลูมิเนียมเป็นพื้นที่กว้างซึ่งแสดงแนวการพังทลายของหินทดสอบนี้เกิดขึ้นที่อะลูมิเนียม เปรียบเทียบกับหินทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที พบว่าการพังทลายเกิดตามแนวเส้นครึ่งวงกลม ไม่เกิดลึกเข้าไปในอะลูมิเนียม แต่เกิดบริเวณใกล้ผิวสัมผัสของการเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบทุกสภาวะการเชื่อม การพังทลายดังภาพที่ 5 ก. เกิดขึ้นกับรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250-500 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-125 มิลลิเมตรต่อนาที ขณะที่การพังทลายดังภาพที่ 5 ข. เกิดขึ้นกับเกิดขึ้นกับรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250-500 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150-175 มิลลิเมตรต่อนาที และรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที ทุกความเร็วเดินแนวเชื่อม



ภาพที่ 6 โครงสร้างมหภาคที่ความลึก 3.1 มิลลิเมตร: ก. 250 รอบต่อนาที-50 มิลลิเมตรต่อนาที ข. 500 รอบต่อนาที-25 มิลลิเมตรต่อนาที ค. 750 รอบต่อนาที-75 มิลลิเมตรต่อนาที และ ง. 750 รอบต่อนาที-25 มิลลิเมตรต่อนาที



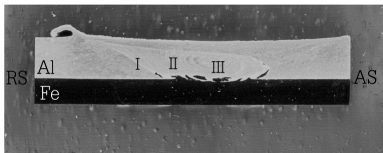
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเอียงของตัวถวนและความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกย

ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบต่างๆ พบว่า รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที มีส่วนของเหล็กถูกกวาดและดันขึ้นสู่ด้านบนของอะลูมิเนียมดังแสดงด้วยลูกศรในพื้นท่งวีในภาพที่ 6 ก. ขณะที่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มมากขึ้นเป็น 500 ถึง 750 รอบต่อนาทีนั้น ส่วนของเหล็กดังกล่าวถูกดันขึ้นสู่อะลูมิเนียมน้อยลงดังภาพที่ 6 ข. และ ค. นอกจากนั้นการใช้ความเร็วรอบสูงและความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ เช่น 750 รอบต่อนาที และ 25 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้เกิดความร้อนสูง และทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์เป็นรูด้านแอดวานซึ่งดังภาพที่ 6 ง. และส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนต่ำ

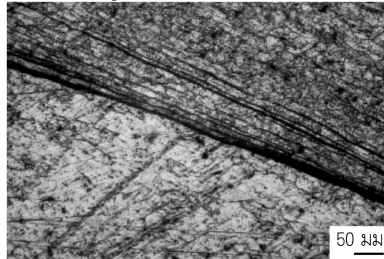


ภาพที่ 7 แสดงการเพิ่มค่าความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อเกย เมื่อความเอียงของตัวกวนเปลี่ยนแปลงจาก 0-2 องศา และลดเพียงเล็กน้อยเมื่อความเอียงของตัวกวนเพิ่มเป็น 3 องศา ที่ความเอียง 2-3 องศา นี้ รอยต่อเกยเกิดการพังทลายที่บริเวณอะลูมิเนียมดังภาพที่ 4 ก. และ ข. จึงกล่าวได้ว่าสภาวะการเชื่อมที่ทำให้รอยต่อเกยมีความแข็งแรงเหนือนสูงที่สุด คือ รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเอียงของตัวกวน 2 องศา จากนั้นเมื่อความเอียงของตัวกวนเพิ่มขึ้นจาก 3-5 องศาแล้ว ความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อเกยมีค่าลดลงและรอยต่อเกยเกิดการพังทลายที่บริเวณผิวสัมผัส ความเอียงของเครื่องมือเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับแกนแนวตั้งของเครื่องกัดนี้ส่งผลทำให้บ่าเครื่องมือด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมที่ทำหน้าที่กัด อัด และกวน โลหะอ่อนตัวที่ไหลอยู่ภายใต้เครื่องมือเชื่อม ถูกดลึกลงไปในเนื้อโลหะและทำให้เกิดการไหลวนที่รุนแรงขึ้นและมีทิศทางวิ่งลงด้านล่างของแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น การไหลวนที่รุนแรงของโลหะเชื่อมส่งผลต่อการทำให้เกิดการรวมตัวของโลหะด้านล่างบ่าเครื่องมือ และส่งผลทำให้สมบัติทางกล เช่น ความแข็ง และความแข็งแรงของโลหะเชื่อมเสียดทานกวนดีขึ้น (Sadmai, Kaewwichit, Roybang, Keawsakul, & Kimapong, 2015)

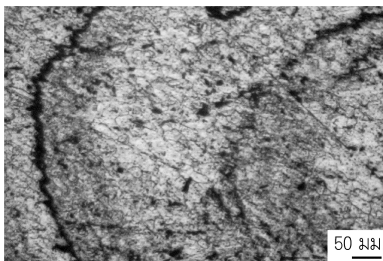
ก. 50 รอบต่อนาที-50 มม. ต่อนาที



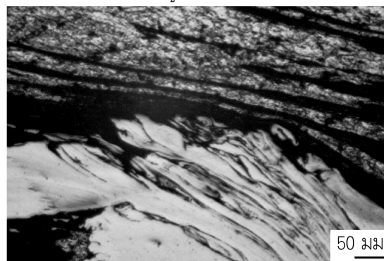
ข. ขอบเขตอะลูมิเนียมและพื้นที่การกวน



ค. พื้นที่การกวน



ง. ผิวสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก



**ภาพที่ 8** โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกตัวกวน 3.1 มิลลิเมตร และความเอียงตัวกวน 2 องศา

ภาพที่ 8 ก. แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกตัวกวน 3.1 มิลลิเมตร และความเอียง 2 องศา รูปร่างของโครงสร้างมหภาคที่กลางพื้นที่การกวนแสดงอะลูมิเนียมขนาดเป็นวงรี พื้นที่วงรีกึ่งกลางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมที่แสดงในภาพที่ 8 ก. นี้เรียกว่า “พื้นที่นั้กเกต (Nugget zone)” หรือ “วงแหวนหัวหอม (Onion ring)” (Li, Murr, & McClure, 1999) บริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อเกยในพื้นที่การเชื่อมพบส่วนของเหล็กขนาดเล็กถูกดันขึ้นไปด้านอะลูมิเนียมในพื้นที่การกวนตลอดแนวพื้นที่การเชื่อม (Ramachandran, Murugan, & Shashi Kumar, 2015; Pourali, Abdollah-zadeh, Saeid, & Karga, 2017) เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ตำแหน่ง I ถึง III มีรายละเอียดของการตรวจสอบดังต่อไปนี้



ภาพที่ 8 ข. แสดงพื้นที่ I คือ ขอบเขตระหว่างพื้นที่อะลูมิเนียมที่ไม่เปลี่ยนแปลง และพื้นที่การกวน พบว่า อะลูมิเนียมในพื้นที่การกวนนั้นมีการถูกกัดกัดและเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการกวนของตัวกวน พื้นที่นี้ คือ “เขตอิทธิพลความร้อนและแรงกล” ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดการปรับสภาพจากความร้อนและแรงกวนอะลูมิเนียม มีผลทำให้เม็ดเกรนมีรูปร่างกลมมน พื้นที่ III (ดังภาพที่ 8 ค.) คือขอบเขตวงแหวนหัวหอมที่แสดงการขึ้นของวงแหวนด้วยเส้นลึกลับที่บ่งบอกการอัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ของอะลูมิเนียมเมื่อเกิดการกวน โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อภายในพื้นที่การเชื่อมดังภาพที่ 8 ง. แสดงพื้นที่ที่เหล็กสีขาวที่อยู่ด้านล่างของรูปบริเวณที่ติดกับพื้นที่สีดำเข้มซึ่งเป็นพื้นที่ที่เหล็กและอะลูมิเนียมเกิดการอัดตัวเข้าหากันนั้น แสดงลักษณะแนวของการเปลี่ยนรูปด้วยแรงทางกล ซึ่งเหล็กบริเวณนี้ถูก กัด อัด ถู และกวนจนกระทั่งเกิดการอ่อนตัว บางส่วนของเหล็กถูกดันขึ้นไปสู่ด้านของอะลูมิเนียม พื้นที่สีเทาเข้มแสดงการลดขนาดเกรน และมีขนาดเล็กกว่าอะลูมิเนียมที่อยู่ในพื้นที่การกวนทั่วไป ขณะที่พื้นที่สีดำ คือ พื้นที่ของการอัดรวมตัวของอะลูมิเนียมและเหล็ก พื้นที่การรวมตัวแน่นนี้ไม่สามารถตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้

## สรุป

บทความนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวน คือ ความเร็วรอบ ความเร็วเดินแนวเชื่อม และความเอียงของตัวกวน ที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ได้ผลการทดลองดังนี้

- ตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมมีความแข็งแรงเฉือนสูงสุด คือ ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของตัวกวน 3.1 มิลลิเมตร และความเอียงของตัวกวน 2 องศา ที่ค่าความแข็งแรงเฉือนของแนวเชื่อมสูงกว่าอะลูมิเนียมหลัก
- การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมของตัวกวนส่งผลต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยความเร็วที่สูงเกินไปทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่ำ
- ความเอียงของตัวกวนทำให้การกัด อัด และกวนให้เศษเหล็กดันขึ้นไปยึดกับอะลูมิเนียมมีค่ามากขึ้นทำให้เพิ่มความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยได้
- โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกยแสดงชั้นการอัดตัวแน่นระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กที่ผิวสัมผัสรอยต่อเกย

## ขอเสนอแนะ

โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก ที่เกิดการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กจากการกัด อัด และกวนอย่างรุนแรง เป็นพื้นที่ที่เกิดเฟสโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กที่ส่งผลต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อ จึงควรมีการศึกษาคีราเคราะห์เพื่อระบุชนิดของโลหะผสมที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีความเที่ยงตรงสูง เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Transmission electron microscope: TEM) หรือการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย





## รายการอ้างอิง

- Dinda, S. K., Basiruddin, M., Roy, G. G., & Srirangam, P. (2016). Microstructure and mechanical properties of electron beam welded dissimilar steel to Fe-Al alloy joints. **Materials Science and Engineering: A**, **677**, 182-192.
- Kimapong, K., & Watanabe, T. (2005). Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding. **Materials Transactions**, **46**(4), 835-841.
- Li, Y., Murr, L. E., & McClure, J. C. (1999). Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum. **Materials Science and Engineering: A**, **271**(1-2), 213-223.
- Pourali, M., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T., & Kargar, F. (2017). Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminum friction stir welds. **Journal of Alloys and Compounds**, **715**, 1-8.
- Ramachandran, K. K., Murugan, N., & Shashi Kumar, S. (2015). Influence of tool traverse speed on the characteristics of dissimilar friction stir welded aluminium alloy, AA5052 and HSLA steel joints. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, **15**(4), 822-830.
- Sadmai, K., Kaewwichit, J., Roybang, W., Keawsakul, N., & Kimapong, K. (2015). Microstructure and Tensile Strength of Butt Joint between AA6063 Aluminum Alloy and AISI304 Stainless Steel by Friction Stir Welding. **International Journal of Advanced Culture Technology**, **3**(1), 179-187.
- Tanaka, T., Morishige, T., & Hirata, T. (2009). Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys. **Scripta Materialia**, **61**(7), 756-759.
- Zheng, Q., Feng, X., Shen, Y., Huang, G., & Zhao, P. (2016). Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal. **Journal of Alloys and Compounds**, **686**, 693-701.