

## อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมพริกชั้นสเตอร์ต่อกลสมบัติรอยต่ออลูมิเนียมและเหล็กกล้า

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์<sup>1)</sup> และอนินท์ มีมนต์<sup>2)</sup>

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเชื่อมรอยต่อชนแผ่นอลูมิเนียมผสมและแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยวิธีการเชื่อมพริกชั้นสเตอร์ โดยมีการศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ เช่น ความเร็วรอบในการหมุนของตัวกวน ระยะตำแหน่งของตัวกวนในรอยต่อ และขนาดความโตของตัวกวน ผลการทดลองที่ได้คือ รอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสามารถทำการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการเชื่อมพริกชั้นสเตอร์ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าประมาณร้อยละ 86 ของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของอลูมิเนียมผสม เศษเล็กๆ ของเหล็กถูกดันเข้าสู่แนวเชื่อมก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่บริเวณด้านบนของแนวเชื่อมและทำให้เกิดการพังทลายของรอยต่อตามแนวเชื่อมยึดของเหล็กและอลูมิเนียม ขณะที่กึ่งกลางและด้านล่างของแนวเชื่อมไม่มีการก่อการต่อของสารประกอบกึ่งโลหะ

## ABSTRACT

This paper proposes an application of a friction stir welding to butt-weld an aluminum alloy plate to a low carbon steel plate. The effects of pin rotation speed, position of the pin axis and pin diameters on tensile strength and microstructure of the joint were investigated. The main results are as follows. Butt joint welding of an aluminum alloy plate was easily and successfully achieved. The maximum tensile strength of the joint was about 86% of that of the aluminum

alloy base metal. Many fragments of the steel were scattered in the aluminum alloy matrix and a fracture tended to occur along the interface between the fragment and the aluminum matrix. A small amount of intermetallic compounds was formed at the upper part of the steel/aluminum interface while no intermetallic compounds were observed in the middle and the bottom regions of the interface. A small amount of intermetallic compound was also often formed at the interface between the steel fragments and the aluminum matrix. The regions where the intermetallic compounds formed seemed to be fracture paths in a joint.

## 1. บทนำ

การลดน้ำหนักโครงสร้างของรถยนต์เป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดเชื้อเพลิงและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ วัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อลูมิเนียมผสม ได้มีการนำมาใช้ทดแทนชิ้นส่วนบางตัวที่ทำจากเหล็ก ด้วยเหตุนี้รอยต่อของเหล็กและอลูมิเนียมจึงมีการใช้งานเพิ่มขึ้นในโครงสร้างยานยนต์ภายใต้สภาวะนี้จึงมีความพยายามในการเชื่อมต่อเหล็กและอลูมิเนียมเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมที่ทำให้เกิดรอยเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นไปได้ด้วยความยากลำบากเนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่แสดงความเปราะมักก่อตัวขึ้นในแนวเชื่อมที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยพยายามทำการศึกษา และเชื่อม

<sup>1)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
โทรศัพท์/โทรสาร : 0-2549-3490 จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ jomyut@rmut.ac.th

<sup>2)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
โทรศัพท์/โทรสาร : 0-2549-3490 จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ anin@rmut.ac.th

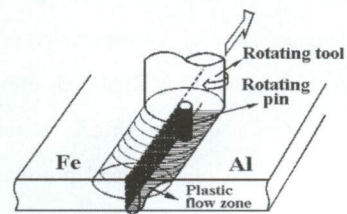
อลูมิเนียมผสมเข้ากับเหล็กด้วยกระบวนการเชื่อมต่างๆ และมีการรายงานผลการศึกษา คือ การเชื่อมความต้านทาน (Friction Welding) แต่กรรมวิธีนี้มีข้อจำกัดที่ชิ้นงาน อย่างน้อยหนึ่งข้างจะต้องมีภาคตัดเป็นทรงกลม [1] การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic Welding) แต่วิธีกรรมวิธีนี้มีการประยุกต์ใช้งานไม่ค่อยแพร่หลาย และปัจจุบันใช้กับงานที่มีความหนาของแผ่นวัสดุไม่มาก [2] การเชื่อมแบบใช้เลเซอร์ (Laser Welding) เป็นอีกวิธีที่มีการใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก แต่กรรมวิธีนี้ยากต่อการควบคุมความร้อนแนวเชื่อม (Heat Input) ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะ และอุปสรรคในการเชื่อมมีราคาค่อนข้างสูง

การเชื่อมฟริกชันสเตอร์ (Friction Stir Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีการคิดค้นโดยสถาบันการเชื่อม (The Welding Institute: TWI) ประเทศอังกฤษ [4] และเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่อุณหภูมิการเชื่อมต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ ซึ่งเป็นผลดีทำให้วัสดุไม่เกิดการหลอมละลาย และในกรณีการเชื่อมรอยต่อของเหล็กและอลูมิเนียม คาดว่าการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะจะมีปริมาณลดลงหรือถูกกำจัดออกที่ผ่านมามีงานวิจัยที่นำเสนอการประยุกต์การเชื่อมฟริกชันสเตอร์ในการเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็กไม่มากนัก [5-6] ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนจึงมีจุดประสงค์ในการใช้การเชื่อมโลหะแบบฟริกชันสเตอร์ในการเชื่อมรอยต่อชนแผ่นอลูมิเนียมผสมและแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

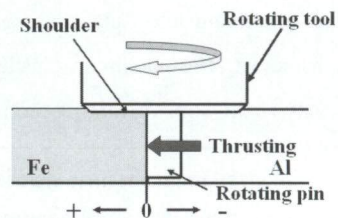
2. วิธีการทดลอง

รูปที่ 1 อธิบายตำแหน่งของตัวกวน (Rotating Pin) ในการเชื่อมแบบฟริกชันสเตอร์ รูป 1(ก) แสดงภาพสามมิติการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ (Rotating Tool) เพื่อเชื่อมวัสดุเข้าด้วยกัน และรูป 1(ข) แสดงภาคตัดตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อม เพื่อแสดงตำแหน่งของเครื่องมือและตัวกวน (Pin) ตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดจะถูกกดลงในแนวตั้งสู่แผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) จากนั้นตัวกวนจะเคลื่อนที่ในแนวขนานเข้าหาผิว

ด้านข้างแผ่นเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) ผิวด้านข้างของตัวกวนที่หมุนจะขัดและกำจัดชั้นพื้นผิวบางๆ ของแผ่นเหล็กทำให้เหล็กที่ถูกขัดเกิดการกระตุ้น เรียกว่า “ผิวกระตุ้น (Activated Surface)” [5] ขณะเดียวกันอลูมิเนียมที่เกิดการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างตัวกวน และอลูมิเนียมจะถูกดันเข้าไปหาผิวกระตุ้น และเกิดการยึดตัวของอลูมิเนียมและเหล็ก เนื่องจากกระบวนการนี้ตัวกวนถูกกดลงในอลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก และปลายของตัวกวนไม่ได้สัมผัสกับเหล็กจึงทำให้เกิดการสึกกร่อน (Wear) ของตัวกวนค่อนข้างน้อย เปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบ ฟริกชันสเตอร์ที่ค้นพบโดย TWI ความแตกต่างของกระบวนการ คือตำแหน่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวนและตำแหน่งแนวตะเข็บของรอยต่อชนของกรรมวิธีที่คิดค้นโดย TWI จะต้องเป็นแนวเดียวกัน ขณะที่ตำแหน่งดังกล่าวในการวิจัยนี้ไม่จำเป็น ต้องเป็นแนวเดียวกัน นอกจากนี้ในรายงานผลการศึกษาก่อนหน้านี้ [5] พบว่า หากตำแหน่งดังกล่าวเป็นแนวเดียวกันในกรณีการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก รอยเชื่อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากตัวกวนเกิดการแตกหักของตัวกวน และเป็นสาเหตุให้วัสดุรอบๆ ตัวกวนไม่เกิดการไหลวนรอบๆ ตัวกวนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ไม่ทำให้เกิดแนวเชื่อม



(ก) การวางแนววัสดุสำหรับการเชื่อม FSW



(ข) ตำแหน่งการวางตัวกวนบริเวณรอยต่อ

รูปที่ 1 ตำแหน่งวัสดุในการเชื่อมต่อชนด้วยการเชื่อมฟริกชันสเตอร์



วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นอลูมิเนียมผสม A5083 (Al-5.0%Mg-0.5%Mn, % โดยน้ำหนัก) และ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 (Fe-0.15%C, % โดยน้ำหนัก) ความหนา 2 มิลลิเมตร (มม.) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของอลูมิเนียมคือ 275 MPa และของเหล็กคือ 455 MPa แผ่นวัสดุถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดกว้าง 40 มม. ยาว 140 มม. ขอบของแผ่นวัสดุด้านความยาว 140 มม. ถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 เพื่อกำจัดรอยที่เกิดจากการตัดด้วยแผ่นตัดความเร็วสูง จากนั้นชิ้นงานจะถูกประกอบในอุปกรณ์จับยึดที่ติดตั้งบนเครื่องกัด

เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูง เบอร์ JIS-SKH-57 โดยบ่า (Tool Shoulder) ของเครื่องมือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอก ไม่มีเกลียวเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 4 มม. ความยาวของตัวกวนวัดจากบ่าเครื่องมือถึงปลายสุดของตัวกวน คือ 1.8 มม. ตัวแปรเชื่อมที่ใช้ทำการเชื่อม คือ ความเร็วรอบ (Revolution per Minute: rpm) ของตัวกวน (Rotational Speed) ตามเข็มนาฬิกา 100 ถึง 1250 rpm ความเร็วเชื่อม (Welding Speed) 25 มิลลิเมตรต่อนาที (Millimeter/Minute: mm/min) อลูมิเนียมจัดวางไว้ที่ด้านรีทริทติ้ง (Retreat Side) ตัวกวนถูกดันเข้าหาชิ้นข้างของแผ่นเหล็ก (Thrusting Distance) ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) มีค่า -0.2 ถึง 2.0 มม. ที่ตำแหน่ง 0.0 มม. คือ ตำแหน่งด้านข้างของตัวกวนสัมผัสพอดีกับด้านข้างของแผ่นเหล็ก

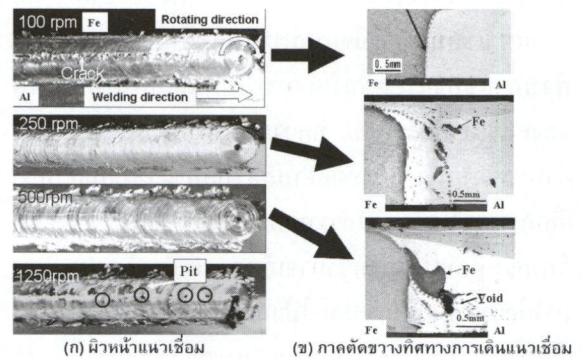
ใช้วิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อ ชิ้นทดสอบแรงดึงจะตัดจากชิ้นงานเชื่อมในตำแหน่งที่เกิดการพังทลาย โดยตัดให้ทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ถูกเตรียมลักษณะเดียวกันกับชิ้นทดสอบแรงดึง จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกขัดตามขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนมีความมันวาวจะถูกนำมากัดโครงสร้างเฉพาะด้านของเหล็กด้วยสารละลายไนตรัล 3% เพื่อแสดงความแตกต่างของแนว

เชื่อม ชิ้นงานถูกนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่ต่อเชื่อมกับการวัดการกระจายตัวของพลังงานรังสีเอ็กซ์ (X-ray Energy-dispersive Spectroscopy: EDS)

### 3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

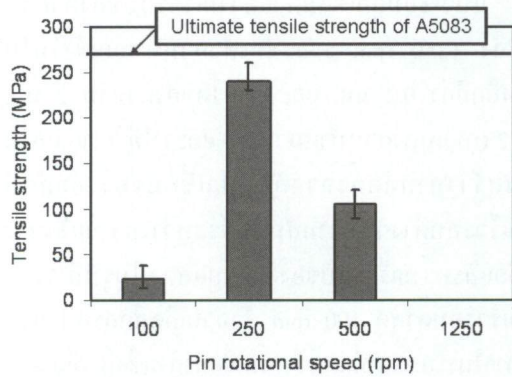
#### 3.1 อิทธิพลความเร็วรอบตัวกวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อ



รูปที่ 2 ผิวหน้าแนวเชื่อมและภาคตัดขวางที่ความเร็วรอบต่างๆ

แนวเชื่อมถูกเชื่อมด้วยความเร็วรอบของตัวกวน 100 ถึง 1250 rpm ระยะของตัวกวนที่สอดเข้าไปในเนื้อเหล็กมีค่า 0.2 มม. และความโตของตัวกวน 2 มม. รูปที่ 2 (ก) แสดงผิวหน้าแนวเชื่อม และรูปที่ 2 (ข) แสดงโครงสร้างภาคตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อมของรอยต่อที่ความเร็วรอบต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยต่อและความเร็วรอบของตัวกวนแสดง ในรูปที่ 3 เมื่อความเร็วรอบต่ำสุด 100 rpm ตัวกวนเกิดสีกกร่อน และพังทลายในระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้นเมื่อทำการเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากแรงเสียดทานน้อยเกิน และไม่เพียงพอในการทำให้อลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัว แนวเชื่อมเกิดขึ้นบริเวณที่ผิวหน้าแนวเชื่อมเท่านั้น แนวการพังทลาย (Fracture Path) ซึ่งแสดงโดยเส้นประเกิดการพังทลายตามอินเทอร์เฟซของรอยต่อตามแนวการเชื่อมยึดที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงต่ำ ความเร็วรอบ 250 rpm ทำให้เกิดแนวเชื่อมที่สมบูรณ์และแสดง

ค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 240 MPa ซึ่งมีค่าประมาณ 86% ของอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการเชื่อม รอยแตกพังทลายของความเร็วรอบนี้เกิดขึ้นตามอินเทอร์เฟซของอลูมิเนียมและพื้นที่เล็กๆ ที่อยู่ในพื้นหลักอลูมิเนียมคังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าส่วนพื้นที่เล็กๆ นี้มีส่วนผสมใกล้เคียงกับเหล็กที่ถูกดันหลุดออกมาจากเหล็กเนื่องจากการขัดสีของตัวกวน ที่ความเร็วรอบ 500 rpm ผิวหน้าแนวเชื่อมมีลักษณะคล้ายกับความเร็วยรอบ 250 rpm แต่ความแข็งแรงของรอยต่อต่ำลง เมื่อตรวจสอบภาคตัดของแนวเชื่อมพบว่ามีการบิดงอเกิดขึ้น และแนวการพังทลายของแนวเชื่อมด้านบนเกิดตามอินเทอร์เฟซของอลูมิเนียมและเหล็ก ที่ความเร็วรอบสูงสุด 1250 rpm ผิวหน้าของแนวเชื่อมเกิดคราบสีดำ ลักษณะเหมือนผิวหน้าเกิดการเผาไหม้แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้พิสูจน์ตรงจุดนี้ ลักษณะที่เกิดขึ้นคาดว่าอาจเกิดจากความเร็วยรอบที่สูงทำให้ความร้อนเพิ่ม และทำให้แมกนีเซียมที่อยู่ในอลูมิเนียมเกิดการเผาไหม้ แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ไม่สามารถทำได้ และทำให้ไม่สามารถเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงได้ซึ่งเป็นสาเหตุแสดงค่าความแข็งแรงเป็นศูนย์

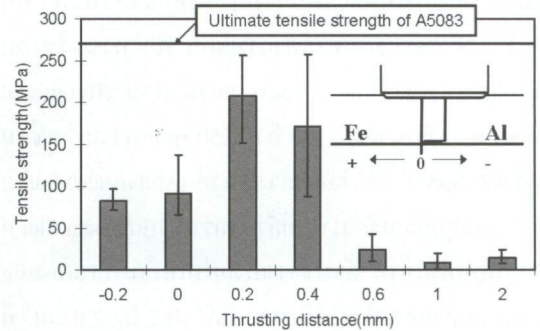


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัวกวนและความแข็งแรงรอยต่อ

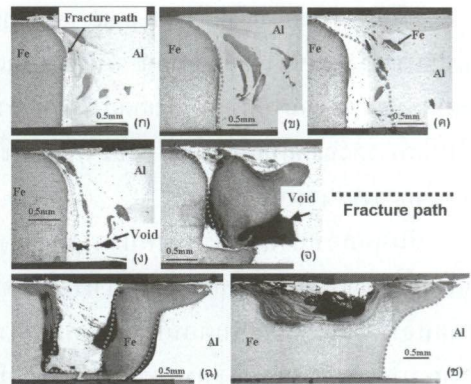
### 3.2 อิทธิพลระยะการวางตัวกวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งของตัวกวนต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 250 rpm

ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25 mm/min เมื่อตำแหน่งของตัวกวนมีค่าเป็นศูนย์หรือลบ ด้านข้างตัวกวนมีตำแหน่งสัมผัสหรือไม่สัมผัสเหล็กและอยู่ในด้านอลูมิเนียม พบว่าค่าความแข็งแรงของรอยต่อค่อนข้างต่ำ การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากการขัดผิวบางๆ ของเหล็กเพื่อสร้างผิวกระตุ้นไม่เพียงพอและเกิดการพังทลายตามแนวอินเทอร์เฟซของอลูมิเนียม และส่วนของเหล็กคังแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 5 เมื่อระยะตำแหน่งของตัวกวนเพิ่มเป็น 0.2 มม. ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด ผิวกระตุ้นถูกสร้างเพียงพอทำให้เกิดการเกาะยึดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กเพิ่มขึ้น และแนวการพังทลายของรอยต่อเลื่อนเข้ามาในบริเวณอลูมิเนียม และเกิดขึ้นตามอินเทอร์เฟซของส่วนของเหล็กที่ถูกดันเข้ามาในแนวเชื่อมกับอลูมิเนียมพื้นหลัก คังแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งตัวกวนและความแข็งแรงของรอยต่อ



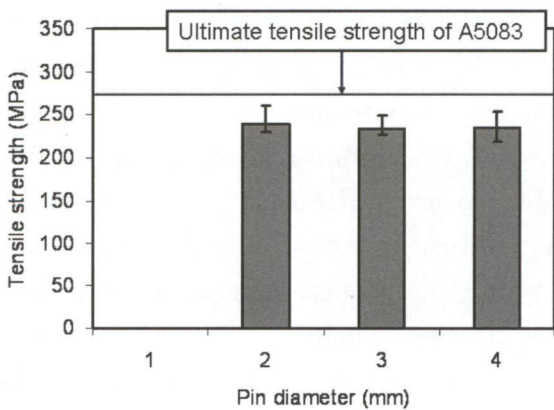
รูปที่ 5 ภาคตัดขวางทิศทางการเชื่อมของรอยต่อที่ระยะตำแหน่งตัวกวนต่างๆ : (ก) -0.2 (ข) 0.0 (ค) 0.2 (ง) 0.4 (จ) 0.6 (ฉ) 1.0 และ (ช) 2.0 มิลลิเมตร



เมื่อระยะตำแหน่งของตัวกวนเพิ่มขึ้นเป็น 0.6 ถึง 2.0 มม. ส่วนของเหล็กถูกดันเข้ามาในแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น และจุดบกพร่องขนาดใหญ่สามารถตรวจพบและเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดลงของความแข็งแรงของรอยต่อนอกจากนี้ที่ระยะ 1.0 และ 2.0 มม. ตัวกวนเกิดการสึกกร่อนและหักออก เมื่อระยะเพิ่มเป็น 2.0 มม. ตัวกวนเกิดการสึกกร่อนและหักออกอย่างรวดเร็วทำให้แนวเชื่อมเกิดการเชื่อมเฉพาะบริเวณใกล้กับบ่าของเครื่องมือเท่านั้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แสดงค่าความแข็งแรงของรอยต่อค่อนข้างต่ำ

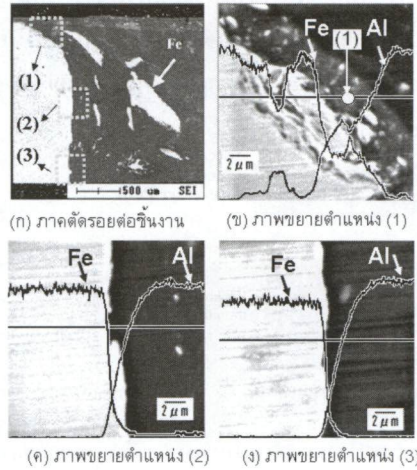
### 3.3 อิทธิพลความโตของตัวกวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

แนวเชื่อมถูกเชื่อมด้วยตัวกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 4 มม. ความเร็วรอบ 250 rpm ระยะตำแหน่งตัวกวน 0.2 มม. ความสัมพันธ์ระหว่างความโตของตัวกวนและความแข็งแรงของรอยต่อแสดงไว้ในรูปที่ 6 เมื่อตัวกวนมีความโต 1 มม. รอยต่อไม่สามารถเชื่อมได้เนื่องจากตัวกวนเกิดการพังทลายเมื่อเริ่มเคลื่อนตัวจาก จุดเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย ขณะที่ความโตของตัวกวนเพิ่มขึ้นเป็น 2 ถึง 4 มม. ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าใกล้เคียงกันและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมของตัวกวนความโต 3 ถึง 4 มม. มีลักษณะคล้ายกับความโตของตัวกวน 2 มม. ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5(ค)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางตัวกวนและความแข็งแรงของรอยต่อ

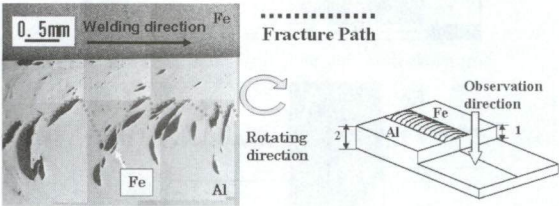
### 3.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด

รูปที่ 7 (ก) แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองนี้ ตำแหน่ง (1) (2) และ (3) ได้นำมาวิเคราะห์การกระจายตัวพลังงานรังสีเอกซ์แบบเส้น (X-ray Energy-dispersive line analysis) เพื่อวิเคราะห์การก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 7 (ข) ถึง (ง) ที่บริเวณด้านบนของรอยต่อใกล้กับบ่าเครื่องมือ แถบบางๆของสารประกอบกึ่งโลหะก่อตัวขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) แต่ตำแหน่งกึ่งกลางและด้านล่างของรอยต่อสารประกอบกึ่งโลหะไม่มีการก่อตัวขึ้น ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบกึ่งโลหะที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุด (1) พบว่าส่วนผสมทางเคมีของจุดดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงสารประกอบกึ่งโลหะชนิด  $FeAl_3$  (19.16% Fe-70.26%Al-5.27%Mg-4.86%O, % โดยอะตอม) เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดสารประกอบกึ่งโลหะเกิดในแผนภาพสมดุลเหล็กและอลูมิเนียม [7] ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความแข็งแรงประา วดค่าความแข็งแรงได้ประมาณ 641 HV<sub>0.01</sub> การสังเกตการพังทลายของชิ้นทดสอบพบว่าเกิดขึ้นที่บริเวณเฟสนี้ก่อนขยายตัวลงสู่ด้านล่างของรอยต่อ จึงกล่าวได้ว่าการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลง การก่อตัวของ

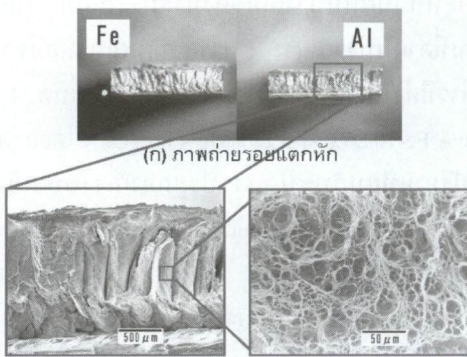
สารประกอบกึ่งโลหะที่แข็งและเปราะที่บริเวณใกล้เคียงบ่าของเครื่องมือ เนื่องจากบริเวณดังกล่าว เป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิรอยเชื่อมที่ผลิตด้วยกระบวนการเชื่อมพริกชั้นสเตอรั่มค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่นๆ ของรอยเชื่อม [8]



(ก) โครงสร้างภายในแนวเชื่อม (ข) ตำแหน่งการตรวจสอบ

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคภายในของแนวเชื่อม (มุมมองด้านบน) ที่แสดงถึงความแข็งแรงสูงสุด

ส่วนของเหล็กที่ถูกดันเข้ามาในแนวเชื่อมนี้เกิดขึ้นก่อนข้างสม่ำเสมอภายในแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 8(ก) ซึ่งแสดง โครงสร้างของรอยต่อที่บริเวณความลึกประมาณ 1 มม. จากผิวด้านบนของแนวเชื่อม และมีทิศทางการตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) สักส่วนของเหล็กถูกขัดและดันเข้าไปอยู่ในแนวเชื่อมและก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะบริเวณอินเทอร์เฟซของส่วนของเหล็กและอลูมิเนียมพื้นหลัก ผลที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุทำให้รอยต่อเกิดการพังทลายตามแนวการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะดังแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 8 (ก)



(ก) ภาพถ่ายรอยแตกหัก (ข) ภาพขยายด้านอลูมิเนียม (ค) รอยแตกหักแบบดิมเบิล

รูปที่ 9 รอยแตกหักของรอยต่อที่แสดงค่าแรงดึงสูงสุด

รูปที่ 9 (ก) แสดงภาพถ่ายรอยแตกหักด้านอลูมิเนียมและเหล็กของชิ้นทดสอบที่แสดงค่าแรงดึงสูงสุด ภาพขยายของรอยแตกหักด้านอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) แสดงลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอของรอยแตกหักซึ่งคาดว่าเป็นตำแหน่งการแตกหักที่เกิดขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟซของส่วน ของเหล็กที่อยู่ในพื้นหลักอลูมิเนียมดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 8 (ก) ขณะผิวที่มีความสม่ำเสมอคาดว่าเกิดการแตกหักเกิดที่บริเวณอลูมิเนียมพื้นหลัก ภาพขยายกำลังสูง ของรอยแตกหักที่ไม่สม่ำเสมอแสดงให้เห็นรูปแบบการแตกหักแบบดิมเบิล (Dimple pattern) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารอยต่อเกิดการแตกหักแบบเหนียว (Ductile mode) ดังแสดงในรูปที่ 9(ค)

#### 4. สรุปผล

กระบวนการเชื่อมพริกชั้นสเตอรั่มสามารถเชื่อมรอยต่อชนของอลูมิเนียมและเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลการทดลองการศึกษาอิทธิพลตัวแปรเชื่อมโดยสรุปมีดังนี้

- 1) การปรับตำแหน่งของตัวกวนเข้าหาและออกจากผิวรอยต่อของแผ่นเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก แนวเชื่อมสามารถเกิดได้โดยวางชิ้นงานอยู่ที่ด้านรีทอร์ทิง
- 2) รอยต่อที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดสามารถเชื่อมได้ด้วยค่าความเร็วรอบที่ทำให้เกิดรอยต่อที่สมบูรณ์ ความเร็วรอบที่ต่ำเกินไปทำให้เกิดความร้อนในแนวเชื่อมที่ไม่เพียงพอต่อการเชื่อม และเป็นสาเหตุให้ตัวกวนเกิดการสีกกร่อนและแตกหัก ขณะที่ความเร็วรอบที่สูงเกินไปทำให้เกิดความร้อนที่สูงเกินไป แนวเชื่อมเกิดการเผาไหม้และทำให้รอยต่อไม่สมบูรณ์
- 3) รอยต่อที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดสามารถเชื่อมได้ด้วยค่าระยะตำแหน่งตัวกวน 0.2 มม. ค่าระยะตำแหน่งตัวกวนที่มากทำให้เกิดดินเหล็กเข้ามาในแนวเชื่อมมากเกินไป ก่อให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมและตัวกวนง่ายต่อการแตกหัก
- 4) สารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะเกิดการก่อตัวที่บริเวณผิวหน้าของแนวเชื่อมเนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นและเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อมีค่าความแข็งแรงลดลง



5) ขนาดความโตของตัวกวนขนาด 2 ถึง 4 มม. มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกลสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Aritoshi and K. Okita, "Friction Welding of Dissimilar Metals" J. of Japan Welding Society, 71-6 (2002) 432-436.
- [2] T. Watanabe, A. Yoneda, "A study on Ultrasonic Welding of Dissimilar Metals" Q. J. of Japan Welding Society 17-5 (1999) 223-242.
- [3] M.J. Rathod and M. Kutsuna, "Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding", Welding J. 83-1 (2004) 16s-26s.
- [4] W.M. Thomas and E.D. Nicholas, "Friction Stir Welding for The Transportation Industries", Materials and Design 18 (1997) 269-273.
- [5] T. Watanabe, H. Takayama and K. Kimapong, "Joining of Steel to Aluminum Alloy by Interface activated Adhesion Welding", Materials Science Forum 426-432 (2003) 4129-4134.
- [6] K. Yoshikawa and T. Hirano, "Numerically Controlled Friction Stir Welding in Layered Dissimilar Metal Materials of Aluminum and Steel", Proceed. of 3rd Inter. Symp. on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, Sept. 27-28, 2001, 1-11.
- [7] U.R Kattner and T.B. Massalski, Binary Alloy Phase Diagrams (ASM International, Material Park, OH, 1990) P. 147.
- [8] P. Ulysse, "Three Dimensional Modeling of the Friction Stir Welding Process", Int. J. of Machine Tools&Manu. 42 (2002) 1549-1557.

### ประวัติผู้เขียนบทความ

ชื่อ: นายกิตติพงษ์ กิมะพงษ์

ตำแหน่ง: อาจารย์ระดับ 5

ประวัติการศึกษา:

- วศ.บ. อุตสาหกรรม (การผลิต)
- วศ.ม. เทคโนโลยีวัสดุ
- Ph.D. Advanced Materials Science and Production Systems Engineering



ประสบการณ์ การฝึกอบรม และงานวิชาการ:

- ฝึกอบรม เรื่อง Operation Process ที่ Northern Alberta Institute of Technology (NAIT), Edmonton, Alberta, CANADA
- ฝึกอบรมเรื่อง Renovation of Process Industry ที่ JICA Kyushu International Center, Kita-Kyushu, Fukuoka, JAPAN

ชื่อ: นายอนันท์ มีมนต์

ตำแหน่ง: อาจารย์ระดับ 6

ประวัติการศึกษา:

- วศ.บ. อุตสาหกรรม (การผลิต)

ประสบการณ์ การฝึกอบรม และงานวิชาการ:

- ฝึกอบรมเรื่อง Operation Process ที่ Northern Alberta Institute of Technology (NAIT), Edmonton, Alberta, CANADA
- วิทยากรและผู้ฝึกสอนภาคปฏิบัติ, โครงการ "ระบบรับรองความสามารถของบุคลากรในอุตสาหกรรมยานยนต์ สาขางานฉีดพลาสติก (Plastic injection)" สถาบันยานยนต์



สถานที่ทำงานและติดต่อ:

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ : 0-2549-3490-2

โทรสาร : 0-2549-3490

จดหมายอิเล็กทรอนิกส์

jomyut@rmut.ac.th (นายกิตติพงษ์ กิมะพงษ์)

anin@rmut.ac.th (นายอนันท์ มีมนต์)