

## อิทธิพลของการเอียงเครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่ออลูมิเนียม 6063 และอลูมิเนียม 7075

### Influence of Tilting the Tool in dissimilar Friction Stir Welding between 6063 and 7075 Aluminum alloys

วิชัย พุ่มจันทร์

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการออกแบบแม่พิมพ์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์ 77110

E-mail: wichaipumchan@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักศึกษาการเอียงเครื่องมือของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนโดยประยุกต์ใช้กับการเชื่อมอลูมิเนียมผสมแผ่นรีดต่างชนิดกันคือ 6063 และ 7075 โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมคือการเอียงเครื่องมือเชื่อมหรือตัวกวน คงที่ความเร็วเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมที่ได้ทำการตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อม, โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานและทดสอบความต้านทานแรงดึง ผลการวิจัยพบว่า การเอียงเครื่องมือส่งผลต่อผิวหน้าแนวเชื่อมเท่านั้น ขณะที่ภายในแนวเชื่อมยังคงมีความสมบูรณ์ไม่เกิดจุดบกพร่องและไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึงซึ่งสามารถสังเกตได้จากการพังทลายของแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์จะเกิดที่ด้านอลูมิเนียมหลัก 6063 ซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียม 7075

**คำสำคัญ** อลูมิเนียมผสม; การเชื่อมอลูมิเนียม; การเชื่อมเสียดทานแบบกวน; รอยต่อชน; ความแข็งแรงดึง

#### Abstract

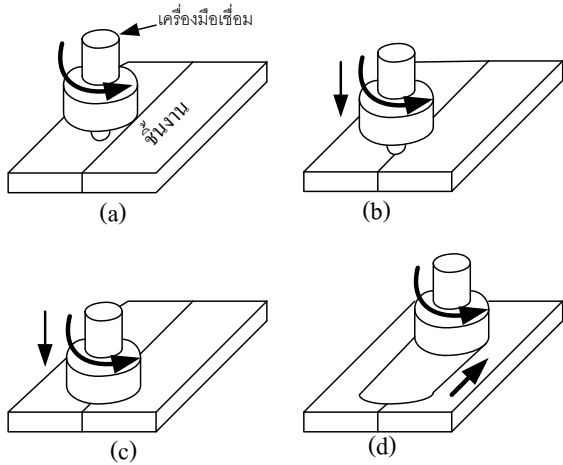
This aimed of research to study tilting of the tool in the friction stir welding application on aluminum alloy 6063 and 7075. Tilting of the tool is defined in the research 0, 2, 4 degree. Welding feed rate 100 mm per minute and speed of tool 2000 rpm were used in the experiments. Weld surface, macro structure of the specimen and tensile strength of joint welding were investigated. As a result, all conditions of tilting the tool, there are significant on weld

surface. Nevertheless, the result of tilting tool has negligible effect on the tensile strength and macro structure. From the results, they indicate the lack point of welding and the fracture on the joint welding that show the fracture occurs on base metal [aluminum alloy 6063] which low strength more than aluminum alloy 7075.

#### 1. บทนำ

การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นงานเชื่อมที่ใช้เทคโนโลยีแบบใหม่ในการเชื่อมกับวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายโดยอาศัยที่แรงเสียดทานทำให้เกิดความร้อนกับวัสดุ ผลจากความร้อนจะทำให้วัสดุอยู่ในภาวะกึ่งแข็ง ทำให้สามารถใช้เครื่องมือเชื่อมวัสดุติดกันได้

ในกระบวนการการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนั้นประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังรูปที่ 1 เริ่มต้นด้วยการจับยึดชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมอย่างแน่นหนาในอุปกรณ์จับยึดบนเครื่องจักรที่ใช้ในการเชื่อม จากนั้นเริ่มต้นหมุนเครื่องมือเชื่อม (Welding Tools) ดังรูปที่ 1(a) จากนั้นทำการกดเครื่องมือเชื่อมส่วนที่อยู่ปลายสุดซึ่งเรียกว่าตัวกวน (Probe) เข้าไปในเนื้อวัสดุดังรูปที่ 1(b) จนกระทั่งบ่าเครื่องมือกดลงบนวัสดุ จากนั้นแซ่ไว้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้วัสดุเกิดความร้อนและอ่อนตัว ดังรูปที่ 2(c) และทำการเดินเชื่อมตลอดทั้งแนวดังรูปที่ 1(d) ด้วยสมบัติที่ดีของแนวเชื่อมจึงทำให้การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวนเป็นที่นิยมและแพร่หลายเรื่อยมาดังเช่นงานวิจัยที่ได้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการ



รูปที่ 1 กระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวน [1]

ตั้งแต่ Wayne Thomas ที่ The Welding Institute ได้ค้นพบวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในปี 1991[2] ต่อมาได้มีผู้ศึกษาอลูมิเนียมหลายๆ เกรดด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน กับตัวแปรต่างๆ เช่น M. Ghosh ,K Kumar S.V. Kailas, A.K. Ray [3] ทำการศึกษาตัวแปรที่ดีที่สุดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนกับวัสดุต่างชนิดกัน บรรเจิด ดอนเนตรงาม และสมนึก วัฒนศรีขกุล [4,5] ศึกษาการใช้ตัวกวนที่มีลักษณะปลายทรงกระบอกตัดโค้งและตัดตรง ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมเกรด AA6063-T6 และศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอลูมิเนียมเจือ AA6063-T1 โดยการเชื่อมเสียดทานหมุนกวนด้วยสลักแกนหมุนทรงกระบอกแบบผิวเรียบกับ แบบผิวเกลียว นราธิป แสงซ้าย, สงกรานต์ บางศรีชัยทิพย์, กิตติ พงษ์กิมะ พงศ์ ทำการศึกษาอิทธิพลรูปร่างตัวกวนต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม AA 6063-T1 [6] Elangovan, K., Balasubramanian ศึกษาขนาดของบ่าและขนาดของเครื่องมือเชื่อมก็ได้มีการศึกษาในอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 [7] ธงชัย เครือชื่อ , ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อทิ้งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [8] การเชื่อมในอลูมิเนียมผสมระหว่างเกรด EN AW 2024-0 และ EN AW 5754-H22 ของ Vural, M., Ogur, A., Cam, G.,

Ozarpa, C [9] การศึกษาสมบัติทางกลของการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด AA 2024 และ AA 7075 [10] เป็นต้น การศึกษาเหล่านี้ได้มีรายงานตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สำหรับแต่ละวัสดุที่นักวิจัยได้ทำการศึกษาไว้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิงและการเลือกใช้ตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อย่างไรก็ตามในกรณีของการเชื่อมองศาเครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบกวนกับอลูมิเนียมผสมเกรด AA6063 และ AA7075 เป็นอีกตัวแปรที่น่าสนใจในการศึกษาและทดลอง ในการประยุกต์ใช้การเชื่อมการเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมองศาเครื่องมือเชื่อมเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมองศาเครื่องมือที่มีต่อแนวเชื่อมการเสียดทานแบบกวน

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในงานวิจัยทำการเลือกอลูมิเนียมผสมต่างชนิดกันโดยสมบัติความแข็งแรงที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ อลูมิเนียมผสมเกรด AA6063 ความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 105 MPa และอลูมิเนียมผสมเกรด AA7075 ความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 235 MPa ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 อลูมิเนียมที่ใช้มีความหนา 6.3 มิลลิเมตร ถูกตัดให้ได้ขนาดด้านกว้าง 75 มิลลิเมตร ด้านยาว 150 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีอลูมิเนียมผสม AA6063

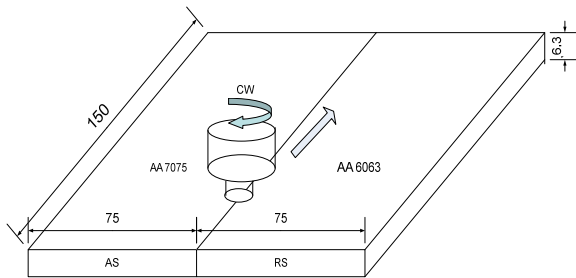
ส่วนผสมทางเคมี	Si	Fe	Cu	Mg	Al
	0.35	0.25	0.1	0.45	Bal.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีอลูมิเนียมผสม AA7075

ส่วนผสมทางเคมี	Zn	Mg	Cu	Cr	Al
	5.1	2.1	1.2	0.18	Bal.

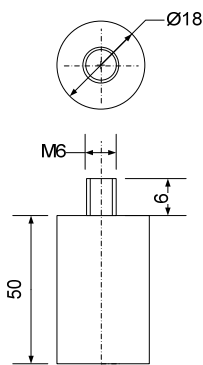
สำหรับขั้นตอนการเชื่อมเริ่มจากวางแผ่นอลูมิเนียมทั้งสองมาต่อชนกันลักษณะดังรูปที่ 2 โดยวางอลูมิเนียมผสม AA 6063 ไว้ทางด้านรีทริททั้ง และอลูมิเนียม AA 7075 ไว้ทางด้าน

แอดวานซ์ ซึ่งจะถูกจับยึดอยู่บนอุปกรณ์จับยึด เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของชิ้นงานขณะทำการเชื่อม



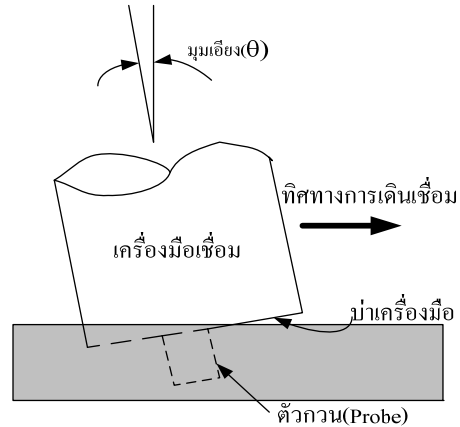
รูปที่ 2 มิติของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

เครื่องมือในการเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด JIS; SKD11 มีรูปร่างทรงกระบอก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่าเครื่องมือมีค่า 18 มิลลิเมตร ตัวกวนมีรูปร่างเป็นเกลียวทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร มีระยะพิชท์เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และมีความยาว 6 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3



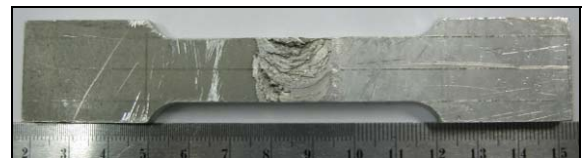
รูปที่ 3 มิติของเครื่องมือเชื่อม (หน่วย: มม.)

สำหรับความเร็วรอบของตัวกวนมีค่า 2000 rpm มีทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกา เดินเชื่อมไปตามแนวต่อชน ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการเปลี่ยนเชื่อมเฉียงทำมุมกับแกน Z ของเครื่องจักร แสดงดังรูปที่ 4 เอียงองศาของเครื่องมือ 0, 2 และ 4 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 4 แสดงการเอียงเครื่องมือเชื่อม

ภายหลังจากเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน AWS D1.2 ดังแสดงในรูปที่ 5 และส่วนที่สองแนวเชื่อมบริเวณกึ่งกลางทิศทางเดินเชื่อมจะถูกตัด นำมาตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางเชื่อม เพื่อเปรียบเทียบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม หากแนวเชื่อมพบจุดบกพร่องที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของรอยต่อลดลง

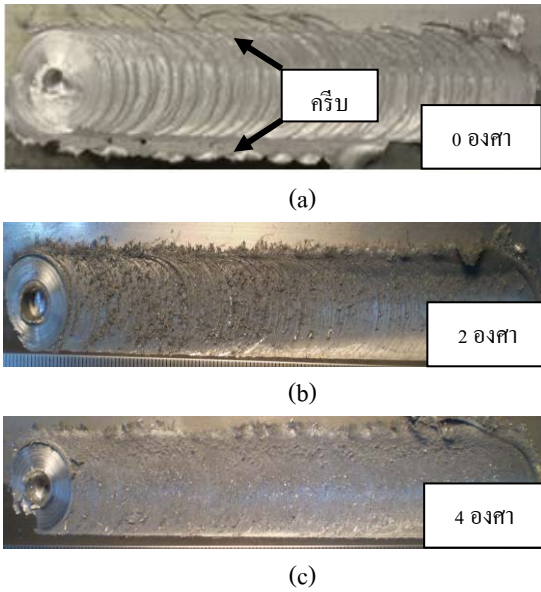


รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง

### 3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

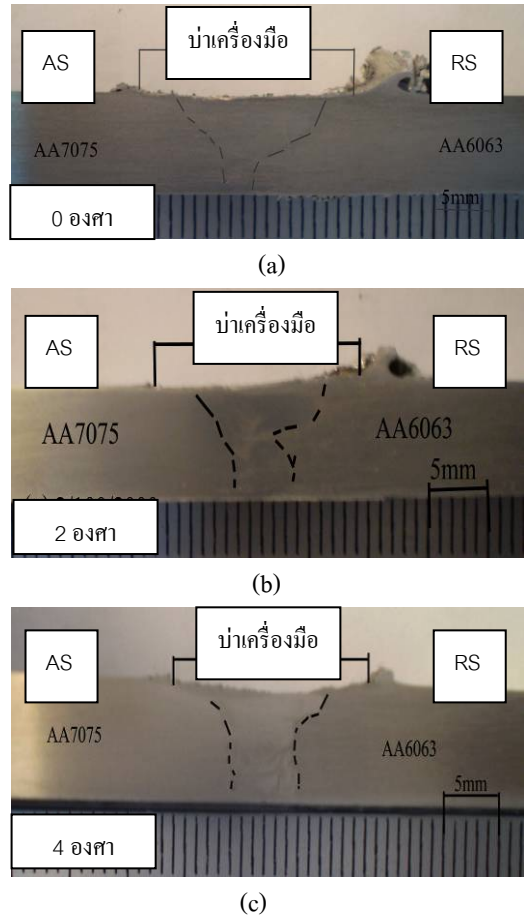
#### 3.1 ผลกระทบของการเอียงเครื่องมือที่ส่งผลต่อผิวหน้าแนวเชื่อม

ภายหลังจากเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนด จึงทำการตรวจผิวหน้าแนวเชื่อมเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ซึ่งจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม ในพื้นฐานของการระบุจุดบกพร่องของการเชื่อมเสียตามแบบกวนนั้นจะคล้ายกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย คือรอยต่อไม่สมบูรณ์ รอยเชื่อมไม่เต็ม การกัดแห้ว



รูปที่ 6 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่องศาการเอียงของเครื่องมือต่างกัน

เป็นต้น ผลการตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อมดังรูปที่ 6 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อม ของแต่ละระดับการเอียงเครื่องมือพบว่า บริเวณผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่พบจุดบกพร่องกับทุกองศาที่ทำการเปลี่ยนแปลง แต่กลับพบว่าผิวหน้าของรอยเชื่อมทุกเงื่อนไขการทดลองมีลักษณะ เป็นเกร็ด ทับซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยมีขนาดของชั้นเกร็ดใกล้เคียงกันกับ อัตราเค้นเชื่อม ดังรูปที่ 6(a)- (c) ตามลำดับ ซึ่งสภาวะดังกล่าวเกิดจากอุณหภูมิ ในขณะที่ทำการเชื่อมส่งผลให้วัสดุอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งแตกที่ต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นมีความแข็งแรงต่างกันทำให้เนื้อวัสดุไม่สามารถรวมได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเอียงเครื่องมือที่เงื่อนไของศา 0 องศา เกิดครีบกขนาดใหญ่บริเวณด้านข้างดังรูปที่ 6(a) ในขณะที่ การเอียงองศาเชื่อมที่ 2 และ 4 องศา เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สาเหตุที่ครีบกมีขนาดใหญ่การเอียงที่ 0 องศา นั้น เนื่องจากการกดบ่าเครื่องมือเชื่อมลงบนชิ้นงานเดิม พื้นที่หน้าตัดบ่าเครื่องมือทำให้เกิดการคั่นเนื้อวัสดุออกทางด้านข้างทำให้ปรากฏครีบก และเมื่อปรับให้เครื่องมือเอียงองศาที่ 2 และ 4 องศา พื้นที่หน้าตัดบ่าเครื่องมือที่กดลงสัมผัสผิวหน้าชิ้นงานน้อยจึงส่งผลให้เกิดครีบกน้อยลงตามไปด้วย



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่การเอียงองศาเครื่องมือแตกต่างกัน

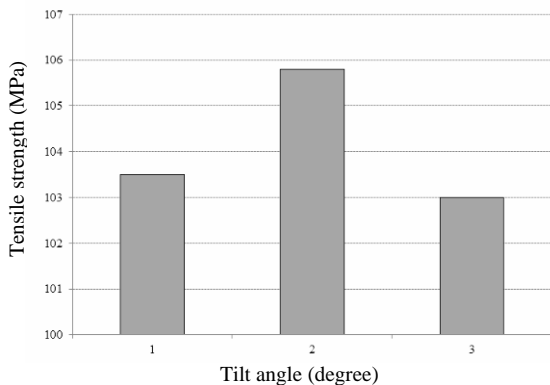
### 3.2 ผลกระทบของการเอียงเครื่องมือต่อความสมบูรณ์ของโครงสร้างแนวเชื่อม

ภายหลังจากทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยเงื่อนไขการเอียงเครื่องมือที่องศาต่างกัน เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ซึ่งบางกรณีจะพบโพรงในแนวเชื่อมซึ่งอาจทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมลดลง จึงทำการผ่าชิ้นงานบริเวณเค้นเชื่อมเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของเนื้อโลหะ ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ดังรูปที่ 7(a), 7(b) และ 7(c) พบว่าแนวเชื่อมของทั้งสองวัสดุทุกเงื่อนไขการทดลองนั้นสามารถเชื่อมติดกันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้เชื่อมั่นได้ว่าการเอียงเครื่องมือแนวเชื่อมนั้น ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของแนวเชื่อม

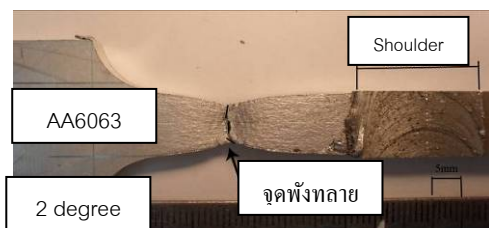
**3.3 ผลกระทบของการเอียงเครื่องมือต่อความ**

**ต้านทานแรงดึง**

สำหรับความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่ทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง Tensile test ผลการทดสอบดังรูปที่ 8 ภายหลังจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของการเอียงองศาเครื่องมือที่ 0, 2 และ 4 องศา พบว่าการกำหนดองศาเครื่องมือ 0 องศา มีค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 103.49 MPa เมื่อเพิ่มองศาของเครื่องมือให้มีความเอียงที่ 2 องศา ค่าความต้านทานแรงดึงวัดค่าได้ 105.87 MPa และเมื่อเพิ่มองศาของเครื่องมือมากขึ้นจนถึงระดับ 4 องศา ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมอยู่ที่ 103 MPa ซึ่งแสดงผลใกล้เคียงกันทุกองศาที่เอียง เนื่องจากการพังทลายเกิดบริเวณเนื้อวัสดุหลักรูปร่าง 6063 แสดงดังรูปที่ 9 แสดงการพังทลายของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง สำหรับตัวอย่างเป็นของทดสอบความต้านทานแรงดึงของการเอียงเครื่องมือ 2 องศา แสดงว่าแนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าวัสดุหลักที่นำมาเชื่อม



**รูปที่ 8** ความสัมพันธ์การเอียงองศาและความต้านทานแรงดึง



**รูปที่ 9** การพังทลายของชิ้นทดสอบองศาที่เปลี่ยนแปลง

**4. สรุป**

การทดลองการเปลี่ยนแปลงการเอียงเครื่องมือเชื่อมสำหรับเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมแผ่นรีดเกรด AA6063 และอลูมิเนียมแผ่นรีดเกรด AA7075 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 การเอียงเครื่องมือมีผลกระทบกับผิวหน้าแนวเชื่อมของการเชื่อมอลูมิเนียม 6063 และอลูมิเนียม 7075 เมื่อมีการเอียงองศาเพิ่มขึ้นทำให้เกิดครีบและผิวลักษณะเป็นชั้นน้อยลง

4.2 สำหรับการงานวิจัยนี้การเอียงเครื่องมือ 0, 2 และ 4 องศา ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม

4.3 การเอียงองศาไม่มีผลกระทบกับความต้านทานแรงดึงของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม 6063 และอลูมิเนียม 7075

**5. กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณอย่างสูงต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

[1] Mahoney, M.W., Rhodes, C.G., Flintoff, J.G., Spurling, R.A., Bingel, W.H., & Spurling, R. A. (1998). Properties of Friction-Stir-Welding 7075 T651 Aluminum. Metallurgical and Materials Transaction A, 29(7),1955-1964.

[2] TWI Ltd. (2012). Friction Stir Welding. Accessed November 30, 2012. Available from <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/>

[3] Ghosh, M., Kumar K, Kailas, S.V., & Ray, A.K, (2010). Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys. Material & Design, 31(61),3033-3037.

[4] บรรเจิด คอนเนตรงาม และสมนึก วัฒนศรียกุล. (2550). การเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมเสียดทานหมุนกวนอลูมิเนียมเจือ AA6063-T6 ระหว่างสลักแกนหมุนทรงกระบอกหัวตัดตรงกับหัวโค้ง[ซีดีรอม]. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[5] อนุชา ขวัญสุข และสมนึก วัฒนศรียกุล. (2550). เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอลูมิเนียมเจือ AA6063-T1 โดยการเชื่อมเสียดทานหมุนกวนด้วยสลักแกนหมุนทรงกระบอกแบบผิวเรียบกับ แบบผิวเกลียว [ซีดีรอม]. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[6] นราธิป แสงซ้าย, สงกรานต์ บางศรีณย์ทิพย์, กิตติ พงษ์กิมพะวงศ์. (2551). อิทธิพลรูปร่างตัวกวนต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม AA 6063-T1[ซีดีรอม]. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[7] Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tools pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminum alloys. *Materials and Design*, 29(2), 362-373.

[8] ธงชัย เครือผือ , ประภาส เมืองจันทร์บุรี. (2551). อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อทิ้งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน[ซีดีรอม]. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[9] Vural, M., Ogur, A., Cam, G., & Ozarpa, C. (2007). On the friction stir welding of aluminum alloys EN AW 2024-0 and EN AW 5754-H22. *Archives of Materials Science and Engineering*, 28(1), 49-54.

[10] Cavaliere, P., Cerri, E.& Squillace, A (2005). Mechanical response of 2024-7075 aluminum alloys joined

by Friction Stir Welding. *Journal of Materials Science*, 40(14), 3669-3679.